DIW ECON

Das Consulting-Unternehmen des DIW Berlin

# Regionale Wasserstoffrelevanz in Deutschland

*Angebots- und nachfrageseitige Analyse der Wasserstoffwirtschaft für die Landkreisebene - Ein Arbeitspapier im Rahmen des Wasserstoffatlas Deutschland*

**DIW Econ GmbH**

Mohrenstraße 58

10117 Berlin

Kontakt:

Dr. Lars Handrich

Tel. +49.30.20 60 972 - 0

Fax +49.30.20 60 972 - 99

service@diw-econ.de

www.diw-econ.de

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

20. Juni 2024

# Kurzfassung

In Umsetzung des Pariser Klimaabkommens strebt Deutschland die Klimaneutralität bis 2045 an. Auch wenn noch viele Unsicherheiten über die Dekarbonisierungspfade und das klimaneutrale Energiesystem bestehen, werden Wasserstoff und seine Derivate (synthetisches Methan, synthetische Kraftstoffe), zusammen auch P2X genannt, eine wichtige Rolle spielen. Die Unsicherheiten über die zukünftige Ausgestaltung des deutschen Energiesystems führen auch zu Unsicherheiten über die sektorale Wertschöpfung und Beschäftigung.

Ziel dieser Studie im Rahmen des Wasserstoffatlas Deutschland ist die Darstellung und der Vergleich der Beschäftigungsrelevanz von Wasserstoff im regionalen Kontext für Deutschland. Die Wasserstoffrelevanz wird zweidimensional abgebildet und stellt zum einen nachfrageseitig die von technologischen Unsicherheiten der Dekarbonisierung betroffene Beschäftigung dar. Dazu wurden wasserstoffrelevante Branchen in Industrie und Verkehr identifiziert und der Gesamtbeschäftigung auf Kreisebene gegenübergestellt. Zum anderen zeigt sie angebotsseitig ein potentielles, regional erzeugtes Angebot an P2X-Produkten, die einen Teil der Lösung für die nachfrageseitigen Herausforderungen darstellen können. Die angebotsseitige Wasserstoffrelevanz wurde auf Basis des Wasserstoffatlas Deutschland als Potential der Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien quantifiziert.

Die Untersuchung der nachfrageseitigen Relevanz von Wasserstoff zeigt, dass in den meisten Kreisen der Anteil der von der Wasserstoffwirtschaft betroffenen Beschäftigten mit weniger als 5 % relativ gering ist. In einigen Regionen, insbesondere in den industriellen Clustern West- und Süddeutschlands, könnten jedoch bis zu einem Viertel der Beschäftigten betroffen sein. Auf der Angebotsseite ist die Relevanz von Wasserstoff in Norddeutschland besonders hoch. Daher wird der Transport von Wasserstoff im Inland zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Aus arbeitsmarktpolitischer Sicht könnte das hohe Produktionspotenzial in Norddeutschland die regionale Wirtschaft stark beleben. Die damit verbundene Nachfrage nach Fachkräften könnte jedoch auch zu Engpässen führen.

Die nachfrage- und angebotsseitige Relevanz wurde in einer Chancen-Risiken-Matrix gegenübergestellt. Es wurden vier Kreistypen definiert, die im Zuge der Dekarbonisierung in unterschiedlicher Weise von der Wasserstoffwirtschaft betroffen sein werden. Diese Kreistypen zeigen unterschiedliche Bereiche auf, in denen Kreise aktiv werden müssen, um die Herausforderungen der Klimatransformation zu meistern und die Chancen der Wasserstoffwirtschaft zu nutzen. Die Analyse gibt damit einen ersten Einblick in mögliche regionale Chancen und Herausforderungen im Zusammenhang mit der Wasserstoffwirtschaft, zeigt Trends auf und regt Akteure an, über die Rolle von Wasserstoff in ihrem Landkreis nachzudenken.

# Inhaltsverzeichnis

**1. Hintergrund und Zielstellung ... 1**
**2. Einsatzgebiete von P2X-Produkten ... 2**
**3. Methodik ... 4**
3.1 Chancen-Risiken-Matrix ... 4
3.2 Nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz („Risiko“) ... 5
3.2.1 Sektorale Abgrenzung ... 6
3.2.2 Quantifizierung der Wasserstoffrelevanz für die Industrie ... 10
3.2.3 Quantifizierung der Wasserstoffrelevanz für den Verkehrssektor ... 12
3.3 Angebotsseitige Wasserstoffrelevanz ... 14
**4. Ergebnisse ... 15**
4.1 Nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz ... 15
4.1.1 Industrie ... 15
4.1.2 Verkehrssektor ... 19
4.1.3 Aggregat der Sektoren Industrie und Verkehr ... 21
4.2 Angebotsseitige Wasserstoffrelevanz ... 22
4.3 Mapping Chancen-Risiken-Matrix ... 23
**5. Zusammenfassung ... 29**
**Literaturverzeichnis ... 30**
**Anhang A. Sektorenübersichten ... 33**
**Anhang B. Ergebnisse ... 36**

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Chancen-Risiken-Matrix ..... 5
Abbildung 2: Anteil sektoraler Vermeidungstechnologieoptionen nach Reifegrad für Technologien mit hohem und sehr hohem Emissionsminderungspotential ..... 7
Abbildung 3: Anteil der Vermeidungstechnologieoptionen der Industrie nach Reifegrad und Branche ..... 8
Abbildung 4: Sektorale Endenergienachfrage der Ariadne-Szenarien, 2045, in TWh/a ..... 9
Abbildung 5: Anteil Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %) ..... 16
Abbildung 6: Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %) ..... 18
Abbildung 7: Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Industriebeschäftigung je Landkreis (in %) ..... 18
Abbildung 8: Anteil Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %) ..... 19
Abbildung 9: Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %) ..... 20
Abbildung 10: Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei je Landkreis (in %) ..... 21
Abbildung 11: Anteil betroffener Beschäftigung in den Sektoren Industrie sowie Verkehr an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %) ..... 22
Abbildung 12: Wasserstoffpotential als Vielfaches der Stromnachfrage ..... 23
Abbildung 13: Verteilung der Kreise nach Wasserstoffpotential und Nachfragerelevanz ..... 24
Abbildung 14: Chancen-Risiken-Matrix (alle relevanten Branchen) ..... 25
Abbildung 15: Chancen-Risiken-Matrix nach Kreistypen ..... 26
Abbildung 16: Kreise nach Verordnung in der Chancen-Risiken-Matrix ..... 28
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung Anteil Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis ..... 36
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis ..... 36
Abbildung 19: Häufigkeitsverteilungen Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Industriebeschäftigung je Landkreis ..... 37
Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung Anteil Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei an Gesamtbeschäftigung je Landkreis ..... 37

Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Gesamtbeschäftigung je Landkreis ..... 38
Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei je Landkreis ..... 38
Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung in den Sektoren Industrie sowie Verkehr an Gesamtbeschäftigung je Landkreis ..... 39
Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung des Wasserstoffpotentials als Vielfaches der Stromnachfrage ..... 39
Abbildung 25: Geplanter Verlauf der European Hydrogen Backbone bis 2040 ..... 41

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strukturdaten zum Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland ..... 33
Tabelle 2: Anteil Prozesswärme am Energieverbrauch und Anteil Höchsttemperatur an Prozesswärme ..... 34
Tabelle 3: Sektoren mit relevanter Unsicherheit der Energieträgersubstitution in Hochtemperaturprozessen ..... 34
Tabelle 4: Sektoren mit relevanter Unsicherheit der Energieträgersubstitution in stofflicher Nutzung von fossilen Quellen ..... 35
Tabelle 5: Verteilung der Kreise nach nachfrageseitiger und angebotsseitiger Wasserstoffrelevanz ..... 40

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| °C | Grad Celsius |
| BA | Bundesagentur für Arbeit |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMJ | Bundesministerium der Justiz |
| BMUB | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| BWS | Bruttowertschöpfung |
| $CH_3OH$ | Methanol |
| $CH_4$ | Methan |
| $CO_2$ | Kohlenstoffdioxid |
| DV-Geräte | Datenverarbeitungsgeräte |
| EHB | European Hydrogen Backbone |
| GVZ | Güterverkehrszentrum |
| $H_2$ | Wasserstoff |
| HTP | Hochtemperaturprozesse |
| IEA | Internationale Energieagentur |
| KSG | Klimaschutzgesetz |
| LKW | Lastkraftwagen |
| $NH_3$ | Ammoniak |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| P2X, PtX | Power-to-X, Bezeichnung für die Erzeugung synthetischer Energieträger aus Strom (power) |
| WZ | Wirtschaftszweige |

# 1. Hintergrund und Zielstellung

Mit dem Klimaschutzgesetz (KSG) zielt Deutschland auf die Einhaltung europäischer Zielvorgaben im Rahmen des Pariser Klimaabkommens zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf deutlich unter 2 °C (BMJ kein Datum). Um die Zielvorgabe zu erreichen, wurde im Paragraph 3 KSG eine Reduktion der Emissionen um mindestens 65 % in 2030 sowie 88 % in 2040 gegenüber dem Niveau von 1990 bestimmt. Die Netto-Treibhausgasneutralität Deutschlands soll im Jahr 2045 erreicht werden. Damit wird es für Sektoren erforderlich, durch Emissionsvermeidungsmaßnahmen – technologische Anpassungen sowie Konsum- und Produktionsveränderungen – den Ausstoß von Treibhausgasen (mit wenigen Ausnahmen) vollständig zu beenden. Mögliche und notwendige Emissionsvermeidungsmaßnahmen werden sich je nach Emissionssektor unterscheiden. Gemein ist ihnen, dass sie fossile (i.d.R. primäre) Energieträger in der energetischen und nicht-energetischen Nutzung durch regenerativ erzeugte, sekundäre Energieträger wie Strom, Wasserstoff oder synthetische Energieträger ersetzen.

Nicht alle Anwendungen können jedoch sowohl nach jetzigem Technologiestand als auch aufgrund der Wirtschaftlichkeit direkt elektrifiziert werden. Solche Anwendungen werden potentiell auch längerfristig auf klimaneutrale Brennstoffe – biogene Brennstoffe sowie strombasierten Wasserstoff und seine Derivative (e-Fuels) – angewiesen sein. Da aber das Potential für nachhaltige Produktion biogener Brennstoffe begrenzt ist, wird dem Wasserstoff und den e-Fuels in den meisten Szenarien der Treibhausgasneutralität in Deutschland eine deutlich größere Rolle beigemessen (Ariadne Projekt 2021, Sensfuß, et al. 2022).

Die sektoralen Gesamtmengen und Anteile verschiedener zukünftiger Energieträger können aus heutiger Perspektive nur schwer vorhergesagt werden. In welchem Verhältnis zukünftig Sekundärenergieträger sektoral zum Einsatz kommen werden, wird dabei durch die Summe der individuellen Investitionsentscheidungen von wirtschaftlich handelnden Akteuren und politischen Entscheidungen bestimmt. Die Struktur des Energiesystems wird u.a. durch die technologische Entwicklung von Anwendungsoptionen, internationale Entwicklungen und weitere sozio-ökonomische Faktoren kodeterminiert werden. Neben individuellen Entscheidungen betroffener Akteure über den konkreten Einsatz von Technologien wird die politische Rahmen- und Zielsetzung entscheidend über die zukünftigen Strukturen von Energieangebot und -nachfrage mitbestimmen.

Um die lokalen wirtschaftlichen und politischen Akteure zu informieren und anzuregen, wurde der Wasserstoffatlas Deutschland entwickelt.[1] Er zeigt den aktuellen Stand, die regionalen Fortschritte sowie die Chancen und Potenziale von Wasserstoff für die Energiewende und den Klimaschutz in Deutschland.

Ziel der vorliegenden Analyse im Rahmen des Wasserstoffatlas ist es, angebots- und nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz mit Fokus auf Beschäftigung in einem regionalen Kontext für Deutschland abzubilden und einander gegenüberzustellen.

Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Nutzung von Endenergieträgern führen auch zu Unsicherheiten in der sektoralen Wertschöpfung und Beschäftigung. Diese ergeben sich aus dem Risiko, dass einzelne Branchen eine technologische Anpassung nicht oder nur unzureichend vollziehen. Da die regionale Verteilung solcher betroffenen Branchen heterogen sein kann, können auch die Wirkungen auf Beschäftigung heterogen angeordnet sein. Die Analyse zeigt daher auf, in welchem Umfang regionale Beschäftigung von Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen Einsatzes an Technologieoptionen und Endenergieträgern betroffen sein kann. Hierzu fokussiert sich die Analyse auf die Sektoren Industrie und Verkehr. Darüber hinaus wird untersucht, wie regional unterschiedliche Produktionspotentiale für erneuerbare, strombasierte Energieträger (Wasserstoff und e-Fuels) ein Gegengewicht dazu bilden können.

Wir bilden damit eine potentielle regionale Wasserstoffrelevanz ab. Diese ist zweidimensional und stellt zum einen **nachfrageseitig** die durch technologische Unsicherheiten betroffene Beschäftigung dar. Zum anderen zeigt sie **angebotsseitig** ein potentielles, regional erzeugtes Angebot an Wasserstoff und e-Fuels, die möglicherweise ein Teil der Lösung für die nachfrageseitigen Herausforderungen sein können.

In Kapitel 2 wird zunächst auf die möglichen Einsatzgebiete von Wasserstoff und e-Fuels – zusammen auch P2X-Produkte genannt – eingegangen. Kapitel 3 erläutert das Vorgehen bei der Analyse bzw. die angewandte Methodik. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

# 2. Einsatzgebiete von P2X-Produkten

Power-to-X, kurz PtX oder P2X, beschreibt Technologien zur Herstellung gasförmiger oder flüssiger stofflicher Energieträger unter Einsatz von (erneuerbarem) Strom (BMBF kein Datum). Hierzu zählen die beiden Gase Wasserstoff ($H_2$) und synthetisches Methan ($CH_4$) sowie die flüssigen synthetischen

[1] https://wasserstoffatlas.de/de/

Energieträger Methanol ($CH_3OH$), Ammoniak ($NH_3$) und synthetische Ottokraftstoff, Diesel und Kerosin. In der vorliegenden Analyse werden nur solche P2X-Technologien berücksichtigt, die auf einer Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse aus regenerativ erzeugtem Strom aufbauen.[2]

P2X-Energieträger stellen mögliche Substitute (Ersatzprodukte) für fossile Energieträger dar und können so in einer Reihe von Sektoren in verschiedenen Anwendungsbereichen genutzt werden. Bei Wasserstoff ist grundsätzlich eine energetische von einer nicht-energetischen Nutzung zu unterscheiden.

Wasserstoff kann durch Oxidation (durch thermische Verbrennung oder in Brennstoffzellen) energetisch genutzt werden. In Verbrennungsprozessen wird der Wasserstoff in Wärme und ggf. weiter in Bewegungsenergie (in Motoren und Generatoren) umgewandelt. Eine mögliche thermische Nutzung von Wasserstoff besteht in technischen Prozessen, die hohe Temperaturen erfordern, prinzipiell aber auch in Niedertemperaturprozessen wie z.B. in der Nahrungsmittelindustrie oder der Raumwärmeerzeugung in Gebäuden. Bei der energetischen Nutzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle wird durch die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff Strom erzeugt. Dieser Strom kann dann z.B. in Fahrzeugen genutzt werden. Darüber hinaus kann Wasserstoff als saisonaler Speicher genutzt werden und bei Bedarf durch Verbrennung in Gaskraftwerken oder durch Nutzung in Brennstoffzellen wieder in Strom umgewandelt werden.

Nichtenergetisch wird Wasserstoff bereits heute als Grundstoff in der chemischen Industrie u.a. zur Herstellung von Stickstoffdünger eingesetzt. In der Stahlerzeugung wird Wasserstoff zukünftig als Reduktionsmittel eingesetzt. Hier ersetzt Wasserstoff den Kohlenstoff (Kokskohle), der benötigt wird, um den im Eisenerz enthaltenen Sauerstoff zu binden und so Roheisen zu erzeugen.

Aus Wasserstoff erzeugte synthetische Energieträger – flüssige und gasförmige – können prinzipiell äquivalent zu fossilen Substituten eingesetzt werden. Synthetische Ottokraftstoffe, Diesel und Kerosin stellen Alternativen zu fossilen Treibstoffen dar und werden zukünftig dort zum Einsatz kommen können, wo eine Elektrifizierung von Antrieben technisch oder ökonomisch schwierig umzusetzen ist, wie z.B. im Flug- und Schiffsverkehr und ggf. im Schwerlastverkehr.

Methanol, Ammoniak sowie die Olefine Propylen und Ethylen werden in der chemischen Industrie eingesetzt und können dort Produkte aus Erdgas und Erdöl ersetzten. Methanol und Ammoniak können zusätzlich genutzt werden, um Wasserstoff in gebundener Form in Schiffen und LKW zu transportieren und zu speichern.

[2] In anderen Worten, Wasserstofferzeugung aus Erdgas oder Kohle sowie Elektrolyse mit Strom aus fossilen Energiequellen werden nicht berücksichtigt.

# 3. Methodik

## 3.1 Chancen-Risiken-Matrix

Ziel der Studie ist es, für jeden der 400 Landkreise und kreisfreien Städte in Deutschland die potentielle Wasserstoffrelevanz in ihren zwei Dimensionen abzubilden. Es wird folgendes Vorgehen gewählt:

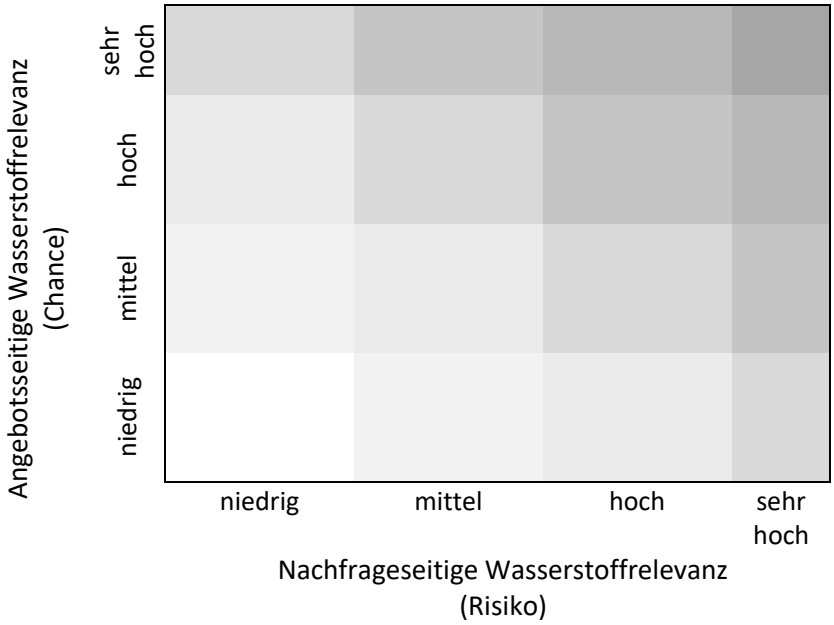
(1) Die nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz im Zuge der Dekarbonisierung wird als Anteil der Beschäftigten in wasserstoffrelevanten Branchen an der Gesamtbeschäftigung in einem Kreis dargestellt. Unter wasserstoffrelevanten Branchen werden dabei Branchen verstanden, für die aufgrund der Klimatransformation relevante Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Technologieentwicklung oder des zukünftigen Energieträgereinsatzes bestehen und in denen Wasserstoff potentiell eine wichtige Rolle als Substitut spielen kann. Diese Dimension wird auch als „Risiko"-Dimension bezeichnet, da die Zukunft der Branchen in der Region vom Erfolg des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft abhängt.

(2) Die angebotsseitige Wasserstoffrelevanz wird als Potential der regionalen Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern in Relation zur eigenen regulären Stromnachfrage (direkte Nutzung in Industrie, Haushalten, etc.) dargestellt. Diese Dimension wird auch als „Chancen"-Dimension bezeichnet, da die jeweilige Region zukünftig die Chance hat, ihr Potential in der Wasserstoffwirtschaft zu nutzen.

Damit ergibt sich eine Chancen-Risiken-Matrix, in der jede Region verortet werden kann (vgl. Abbildung 1). Während für die Dimension Risiken im Wesentlichen die aktuelle Situation beschrieben wird und damit aktuelle Daten verwendet werden, erfolgt die Bestimmung der Chancen – also Potential der Wasserstofferzeugung – basierend auf antizipierten Veränderungen des zukünftigen Potentials. In Anlehnung an den Wasserstoffatlas Deutschland betrachten wir den Zeitraum bis 2050.

Die Kreise können einer von 16 bivariaten Klassen zugeordnet werden. Die Klasseneinteilung je Dimension ergibt sich aus der extremen Verteilung der Risiko- und Chancen-Indikatoren, die den Spitzenregionen in jeder Dimension eine besondere Rolle zukommen lässt. In der unteren Klasse jeder der beiden Dimensionen („niedrig") befinden sich jeweils die 33 % der Kreise mit den niedrigsten Ausprägungswerten, gefolgt von der jeweiligen Klasse mit den mittleren 33 % („mittel") und den oberen 30 % („hoch"). In der vierten Klasse („sehr hoch") sind die Ausreißer nach oben (3 % der Werte) dargestellt.

**Abbildung 1: Chancen-Risiken-Matrix**




Quelle: Eigene Darstellung.

## 3.2 Nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz („Risiko“)

Als Maß der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz wird der prozentuale Anteil an Beschäftigten in Branchen genutzt, die aufgrund von Unsicherheiten in der zukünftigen technologischen Entwicklung und / oder im zukünftigen Energieträgereinsatz vor besonderen Herausforderungen stehen. Der Indikator lässt sich in zwei strukturelle Ebenen zerlegen: den Anteil des übergeordneten Sektors an der Gesamtbeschäftigung des Kreises und den Anteil der betroffenen Branchen am übergeordneten Sektor. Am Beispiel der Industrie setzt sich die nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz in jedem Kreis wie folgt zusammen:

$$Nachfrageseitige\ Wasserstoffrelevanz = \frac{B^I_{H2}}{B} = \frac{B^I}{B}\frac{B^I_{H2}}{B^I},$$

wo $B^I_{H2}$ die Beschäftigtenzahl in den wasserstoffrelevanten Industriebranchen ist, $B^I$ die Beschäftigtenzahl in der Industrie und $B$ die Gesamtbeschäftigung im Kreis.

Die Zerlegung erlaubt es, einen tieferen Einblick in die Treiber der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz zu erhalten und die gesamtwirtschaftlichen Effekte (z.B. den allgemein niedrigen Anteil des Verkehrs an der deutschen Wirtschaft) besser von der Anwendungsstruktur innerhalb der Sektoren zu trennen.

### 3.2.1 Sektorale Abgrenzung

Noch bestehen für einen nicht unerheblichen Teil von heutigen technischen Anwendungen Unsicherheiten über die Frage, durch (a) welche technologische Substitution und (b) durch welche energetische Substitution eine Dekarbonisierung ökonomisch effizient und ökologisch effektiv umsetzbar wird. Solche Unsicherheiten bestehen u.a. durch:

- technische Herausforderungen bei der Umsetzung von Technologien (z.B. $CO_2$-freier Zement),
- die z.T. noch hohen Kosten der Technologien (z.B. für dekarbonisierte Stahlerzeugung),
- das Angebot und damit die Verfügbarkeit alternativer Energieträger (z.B. Wasserstoff),
- Herausforderungen bei der Distribution von alternativen Energieträgern (z.B. Nord-Süd Stromtrassen) sowie
- die zeitliche und räumliche Interdependenz zwischen der Erzeugung, der Verteilung und der Nutzung unterschiedlicher nicht-fossiler Endenergieträger.

Aus diesen Unsicherheiten resultieren zwei wichtige Fragen hinsichtlich der Zukunft des deutschen (und europäischen) Energiesystems: (1) Welche Anwendungstechnologien und welche damit verbundenen Energieträgernutzung werden sich durchsetzen? (2) Wie und wo ist ein konkurrenzfähiges nationales Angebot an erneuerbaren Endenergieträgern möglich bzw. wie müssen Importinfrastrukturen entstehen, um die Nachfrage zu decken?

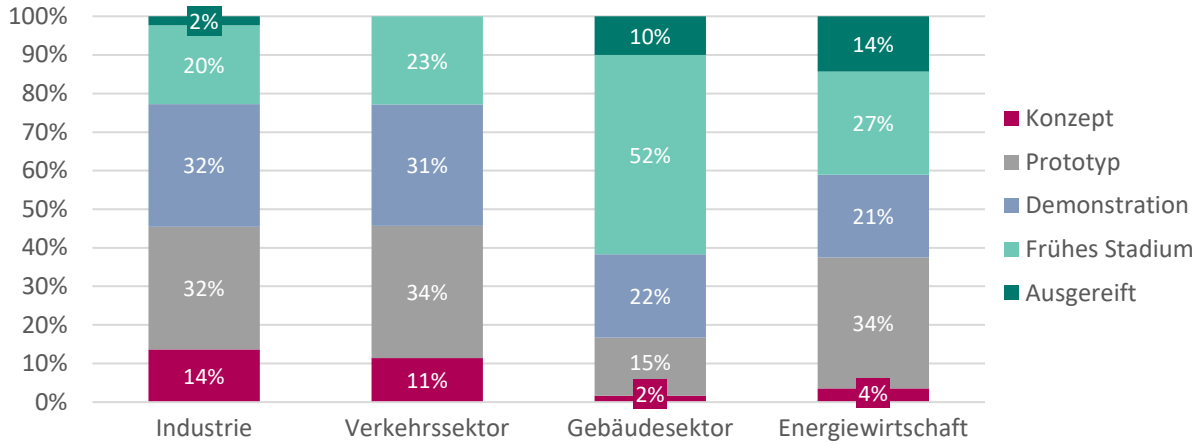
Während für einzelne Sektoren (z.B. bei Wärmeerzeugung in Gebäuden) bereits heute die effektivsten und effizientesten Anwendungstechnologien weitestgehend bekannt sind und zum Einsatz bereitstehen, ist dies für andere Sektoren noch nicht der Fall. Es besteht damit Ambiguität hinsichtlich der zu erwartenden technologischen Optionen und ebenso in Bezug darauf, welche regenerativen Energieträger zum Einsatz kommen.

Einen Anhaltspunkt für diese Ambiguität bzw. die daraus resultierende Unsicherheit hinsichtlich des zukünftigen Einsatzes von Technologien bietet die *Anwendungsreife* solcher Optionen. Dieses Maß drückt aus, wie weit Technologien bereits technisch und ökonomisch realisierbar sowie skalierbar für einen Sektor zur Verfügung stehen. Ebenfalls fließt ein, wie sich ein Ökosystem aus Finanzierung, Förderung, Fachkräften, Vorprodukten und Anwendern bereits etablieren konnte. Je höher der Anteil „nicht-reifer“ emissionsmindernder Technologieoptionen in einem Sektor, desto unsicherer der Ausgang der Wahl zwischen zukünftig zu implementierenden Technologien. Mit dem ETP Clean Energy Technology Guide stellt die IEA (2022) 500 individuelle Technologien der Sektoren Industrie, Gebäude, Verkehr und Energiewirtschaft vor und ordnet die Reife dieser Technologien einer der Kategorien „Konzept“, “Prototyp“, „Demonstration“, „Frühes Stadium“ und „Ausgereift“ zu. In Abbildung 2

werden nur die Technologien betrachtet, die laut der IEA hohe und sehr hohe Relevanz für die Erreichung der Klimaneutralität haben.

Die Auswertung der IEA zeigt, dass die Technologien im Gebäudesektor und z.T. im Sektor der Energiewirtschaft reifer bzw. weiter fortgeschritten sind als in den beiden anderen Sektoren. Dies deutet darauf hin, dass im Gebäudesektor und Teilen der Energiewirtschaft die Unsicherheit in der zukünftigen Technologiewahl geringer ist. Im Gegensatz dazu befindet sich in Industrie und Verkehr fast die Hälfte der Technologien mit hoher und sehr hoher Emissionsminderungsrelevanz noch im Konzept- oder Prototypstadium. Im Verkehrssektor bestehen technologische Herausforderungen vor allem in den Bereichen Güterverkehr, Luftfahrt und Schifffahrt sowie bei der Elektrifizierung des ÖPNV.

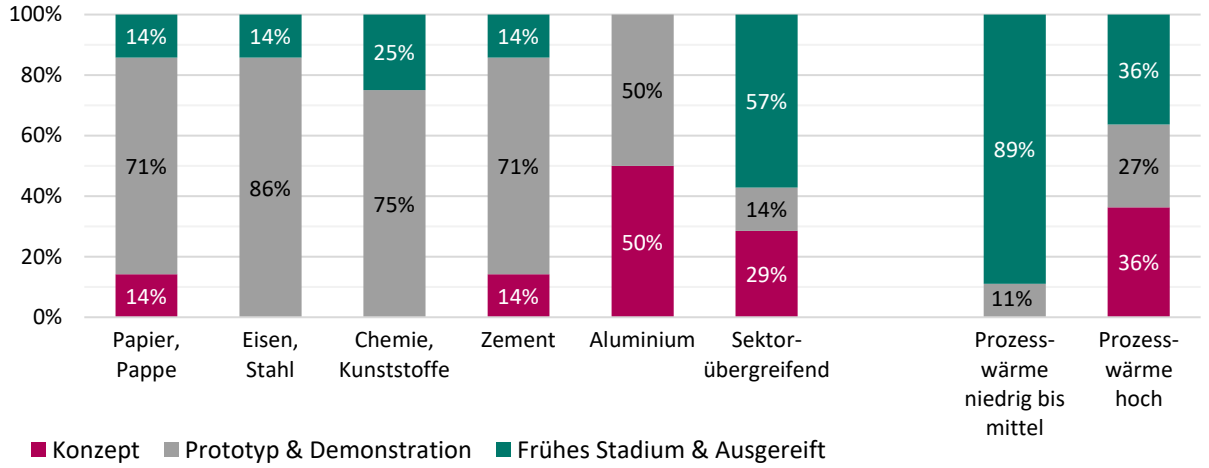
**Abbildung 2: Anteil sektoraler Vermeidungstechnologieoptionen nach Reifegrad für Technologien mit hohem und sehr hohem Emissionsminderungspotential**




Quelle: Eigene Auswertung basierend auf IEA (2022).

Eine tiefere Gliederung des Industriesektors zeigt, dass gerade Wirtschaftszweige, in denen Hochtemperaturprozesse eine zentrale Rolle spielen, einen geringen Anteil an marktreifen Technologien aufweisen (vgl. Abbildung 3). Dies wird noch einmal durch einen Blick auf die sektorübergreifenden Prozesswärmetechnologien (Abbildung 3, zwei rechte Säulen) verdeutlicht. Während für Nieder- und Mitteltemperaturprozesswärme (< 500 °C) die Technologien ausgereift sind, gilt dies für Hochtemperaturprozesse noch nicht.

**Abbildung 3: Anteil der Vermeidungstechnologieoptionen der Industrie nach Reifegrad und Branche**



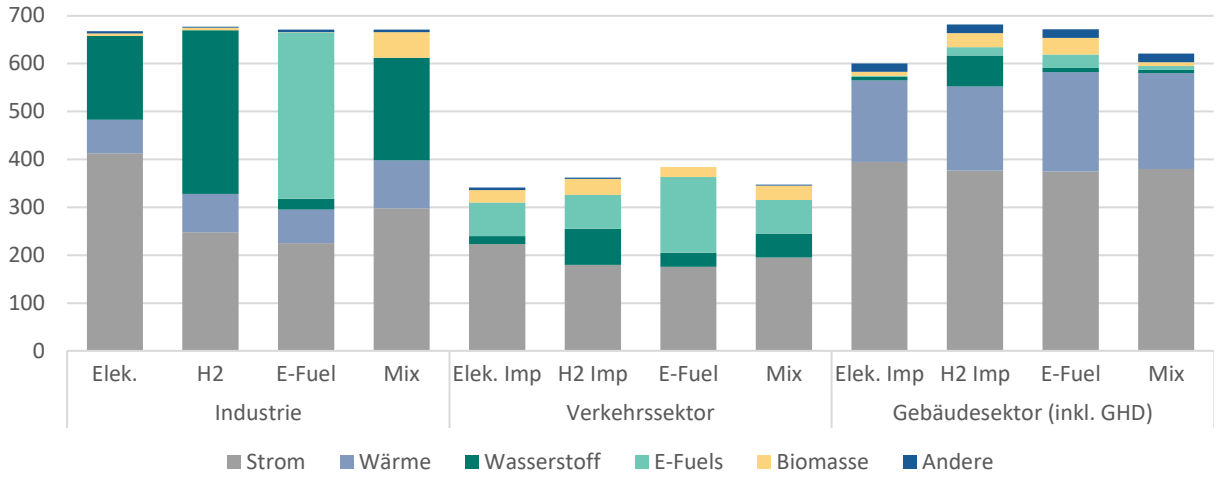

Quelle: Eigene Auswertung basierend auf IEA (2022).

Verschiedenste Kombinationen der Nutzung von Endenergieträgern sind möglich und plausibel, jedoch mit jeweils eigenen Nebenbedingungen, Nebeneffekten und Implikationen verbunden. Hierfür dienen die Ergebnisse des Ariadne Projekts (2021) als ein hilfreiches Beispiel.[3] Es werden vier Energiesysteme unterschieden, in denen bestimmte Energiequellen im Fokus stehen. Im ersten Szenario wird bevorzugt auf Elektrizität („Elek“), im zweiten auf Wasserstoff („H2“) und im dritten auf synthetische Kraftstoffe („E-Fuel“) zurückgegriffen. Im vierten Szenario kommen die drei Energieträger in einem Mix zum Einsatz (vgl. Abbildung 4). Da viele Prozesse gut elektrifizierbar sind, dominiert in allen Szenarien Elektrizität den Energiemix (im Aggregat der Sektoren), Biomasse spielt eine untergeordnete Rolle, und der Beitrag von Wasserstoff sowie e-Fuels schwankt stark zwischen den Szenarien und Sektoren. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass szenariounabhängig Wasserstoff und synthetische Energieträger vor allem in der Industrie und im Verkehrssektor zum Einsatz kommen werden.

In der Industrie werden Anwendungstechnologien genutzt, die nach heutigem Stand der Technik Brennstoffe (im Gegenteil zu bspw. Elektrifizierung) erfordern und für die in Zukunft Wasserstoff, e-Fuels oder Biomasse benötigt werden. Zudem werden in einigen industriellen Prozessen fossile Energieträger zur nichtenergetischen Nutzung eingesetzt (z.B. Herstellung von Plastik aus Erdölprodukten). Wasserstoff bzw. andere P2X-Produkte können in den meisten dieser Prozesse die fossilen Stoffe ersetzen, um klimaneutrale Produktion zu ermöglichen. Der Umfang der Nutzung von Wasserstoff und anderen P2X-Produkten ist in der Industrie noch unsicher, wie am Beispiel der Szenarien des Ariadne Projekts oder auch Samadi (2022) sowie der „Langfristszenarien“ (Sensfuß, et al. 2022) gezeigt wird.

[3] Vergleiche u.a. auch die Ergebnisse der Langfristszenarien: Sensfuß et al. (2022).

**Abbildung 4: Sektorale Endenergienachfrage der Ariadne-Szenarien, 2045, in TWh/a**




Anmerkung: Die Bezeichnung „Imp“ in den Szenarionamen weist darauf hin, dass hier die Energieträger vorrangig importiert werden.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf von Ariadne Projekt (2021).

Im Verkehr wird Wasserstoff bzw. e-Fuels vor allem für Luft- und Schiffsverkehr als eine wichtige Lösung in der Klimatransformation betrachtet. Weiterhin gelten P2X-Produkte als eine mögliche Option im Schwerlastverkehr auf Straße und Schiene, wo vollständige Elektrifizierung wirtschaftlich schwer zu erreichen ist. Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge wird dagegen in der Regel eine Elektrifizierung prognostiziert (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021, Samadi 2022, Sensfuß, et al. 2022).

In anderen Wirtschaftssektoren, wie Dienstleistungen oder Landwirtschaft schätzenwir nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz als gering ein. Während in den Bereichen Dienstleistungen und Landwirtschaft auch Herausforderungen für Dekarbonisierung bestehen, sind die Lösungen in der Regel nicht von der Nutzung von Wasserstoff abhängig. Im Bereich Dienstleistungen (außer Verkehr) findet der überwiegende Teil des Energieverbrauchs im Betrieb der Gebäude unterschiedlicher Typen statt. Aus dem Netz bezogene Strom und Wärme entfallen dabei auf den Energiesektor, während es für die dezentrale Wärmeerzeugung direkt in Gebäuden unsicher bleibt, inwiefern zukünftig Wasserstoff zum Einsatz kommt (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021, Samadi 2022, Sensfuß, et al. 2022). Im Energiesektor ist wiederum zu erwarten, dass Wasserstoff zumindest als saisonale Speicherung für Stromerzeugung bei hohen Anteilen an (variablen) erneuerbaren Energiequellen seine Rolle findet. Auch hier bleiben die zukünftigen technologischen Optionen allerdings weitgehend offen (Samadi 2022, Sensfuß, et al. 2022).

Zur Darstellung der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz fokussieren wir uns daher auf die Sektoren Industrie und Verkehr.[4]

Für die Bestimmung der Unsicherheiten werden aktuelle Daten der Beschäftigung in den Branchen der Industrie und des Verkehrs (Stichtag 30. Juni 2022) genutzt. Dadurch erfolgt jedoch keine Berücksichtigung möglicher exogener und endogener Strukturveränderungen. Solche Strukturveränderungen werden durch Änderungen von Technologie und Nachfrage zwangsläufig in den kommenden Jahren stattfinden. Die Wirkungen solcher Strukturveränderungen können – regional unterschiedlich – stärker als die hier beschriebenen sein. So sind die Beschäftigungseffekte der Produktionsumstellung von Verbrennungsmotoren auf elektrische Antriebe in der deutschen Automobilindustrie mit großer Sicherheit umfänglicher als die hier abgebildeten.

Weiterhin erfolgt keine Bewertung von Beschäftigungseffekten entlang der Wertschöpfungsketten. Das bedeutet, dass nur direkte Beschäftigung innerhalb einer Branche berücksichtigt wird, in dem eine Substitution von Technologien und/oder Energieträgern zu erfolgen hat. Es wird damit unterstellt, dass das Einstellen der Produktion von Vorprodukten mittels Importsubstitution durch beziehende Branchen erfolgen würde.

### 3.2.2 Quantifizierung der Wasserstoffrelevanz für die Industrie

Für einen Teil der in der Industrie genutzten Hochtemperaturprozesse gilt nach jetzigem technologischem Stand, dass sie nicht oder nur schwer elektrifizierbar sind und auf alternative Brennstoffe (Wasserstoff, Biomasse, Abfall) angewiesen sein werden. Weiterhin sind Branchen der Grundstoffindustrie auf Kohlenwasserstoffverbindungen, die heute aus fossilen Quellen wie Kohle, Erdöl und Erdgas gewonnen werden, angewiesen und nutzen diese stofflich. Zur Erreichung der Klimaneutralität in solchen Branchen ist die Nutzung von Wasserstoff oder auch anderen P2X-Alternativen wahrscheinlich. Die Quantifizierung der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz erfolgt damit auf Basis der Industrie- bzw. Prozessstruktur in jeweiligen Kreisen unter der Annahme, dass Branchen, die Hochtemperaturprozesse

[4] Die Nationale Wasserstoffstrategie (2023) sieht vor, dass in den Jahren 2023-2028 insgesamt 8,8 GW an Wasserstoff-, Ammoniak- und Wasserstoffhybridkraftwerken über Ausschreibungen gefördert werden. Darüber hinaus muss beim Neubau von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Anlagen und Gaskraftwerken „H2-Readiness“ nachgewiesen werden. Inwieweit wasserstoffbasierte Stromerzeugung in einem klimaneutralen Deutschland eine Rolle spielen wird, ist allerdings noch unsicher (vgl. Samadi (2022), Fraunhofer ISI et al. (2024)). Gemeinsam ist allen Szenarien, dass der Großteil der Stromerzeugung in einem klimaneutralen Deutschland durch PV und Wind erfolgt. Zudem ist die Beschäftigung in der WZ-Branche Elektrizitätsversorgung nicht nach Energieträgern trennbar. Eine Einbeziehung der Branche, die zukünftig durch andere Prozesse als Wasserstoff dominiert wird, würde daher die Nachfragerelevanz stark überschätzen. Aus diesen Gründen wurde die Stromerzeugung in Wasserstoffkraftwerken nicht in der Nachfragerelevanz berücksichtigt.

(HTP) oder fossile Energieträger stofflich nutzen, stärker betroffen sind, als Branchen, in denen das nicht erfolgt.

Während die grundsätzliche Wasserstoffrelevanz jeweiliger Branchen anhand der eingesetzten Technologien bzw. Produktionsprozessen klassifiziert wird, wird die regionalwirtschaftliche Bedeutung dieser Branchen über die Anzahl der Arbeitsplätze, die sie im Landkreis schaffen, ermittelt. Je höher der Anteil der Beschäftigten im Landkreis ist, die in den relevanten Branchen tätig sind, d.h. je stärker die Beschäftigungsstruktur von HTP und der stofflichen Nutzung von fossilen Energieträgern abhängt, desto höher sind die Unsicherheiten und die nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz im Landkreis.

Für die Bewertung der Beschäftigungsstruktur in der Industrie wird zunächst auf Bundesebene identifiziert, welche 4-Steller-Wirtschaftszweige (WZ) fossile Energieträger für HTP oder stofflich nutzen (die vollständige Liste der identifizierten Branchen ist im Anhang zu finden). Die Bewertung erfolgte in zwei Schritten anhand der Branchenbeschreibungen, Bewertungen der HTP nach 2-Steller-WZ durch Frisch et al. (2010), statistischen Daten zur energetischen und stofflichen Nutzung der Energieträger nach 2-Steller-WZ (Statistisches Bundesamt 2022) sowie eigener Recherche zu Produktionsprozessen in jeweiligen Branchen.

Zunächst werden alle 4-Steller-WZ im verarbeitenden Gewerbe in Bezug auf Präsenz der HTP oder stofflicher Nutzung fossiler Energieträger klassifiziert. Als Temperaturgrenze für HTP wurden dabei 500 °C angenommen, weil für Prozesswärme unter 500 °C bereits heute marktfähige oder nahezu marktfähige Technologien ohne P2X-Einsatz – wie bspw. Hochtemperatur-Wärmepumpen, Solarthermie, Geothermie oder Biomasse – verfügbar sind (Naegler, et al. 2016, Maaß, Sandrock und Fuß 2018, Blommaert 2021). Wasserstoff oder andere P2X-Produkte könnten dabei trotzdem bevorzugt werden, z.B. um Versorgungssicherheit zu erhöhen, sind aber keine technologische Notwendigkeit.

Für die Branchen, die HTP nutzen, wird anschließend überprüft, ob diese fossilen Brennstoffe einsetzen oder bereits heute elektrisch laufen: z.B. Schweißen im Maschinenbau erfordert zwar Temperaturen über 500 °C, wird allerdings automatisiert und elektrisch betrieben. Für solche HTP ist auch in Zukunft keine Relevanz für Wasserstoff oder P2X-Alternativen zu erwarten.

Das Ergebnis ist eine Liste aller wasserstoffrelevanten Branchen des Verarbeitenden Gewerbes auf 4-Steller Ebene. Für diese Branchen kann dann die Summe aller Beschäftigten auf Kreisebene bestimmt werden, die potentiell in nicht bereits elektrifizierten Hochtemperaturprozessen tätig sind bzw. in Branchen arbeiten, deren Produktion mit der stofflichen Nutzung fossiler Energieträger verbunden ist.

Alle Beschäftigungsdaten stammen von der Bundesagentur für Arbeit (BA), die die Anzahl der Erwerbstätigen nach WZ für Landkreise und kreisfreie Städte erfasst. Die Daten auf 4-Steller-WZ-Ebene wurden von der BA ausgewertet und die gesamte Summe der Beschäftigten in wasserstoffrelevanten

Branchen wurde auf Anfrage berechnet und als Einzelindikator für jeden Kreis übermittelt. Mit der direkten Datenanfrage an die BA wird die Herausforderung umgangen, dass bei Veröffentlichung von disaggregierten Daten (2-/4-Steller-WZ regional auf Kreisebene gegliedert) aus Datenschutzgründen viele Schwärzungen entstehen. Die Lücken können durch statistische Methoden geschlossen werden. Allerdings werden die jeweiligen Werte geschätzt und die Schätzungen werden weniger präzise je mehr Schwärzungen im Originaldatensatz vorhanden sind. Durch die individuelle Datenauswertung der BA dagegen entsteht ein einmaliger, hochqualitativer Datensatz, der speziell auf den Bedarf dieser Studie zugeschnitten ist. Insgesamt wurden im Datensatz 57 Schwärzungen (14 % der Kreise) geschätzt, davon jedoch nur 12 (3 %) Kreise, für welche über 2000 Beschäftigten in relevanten Branchen geschätzt wurden. [5]

### 3.2.3 Quantifizierung der Wasserstoffrelevanz für den Verkehrssektor

Im Verkehr wird der Index der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz je Kreis äquivalent dem Vorgehen in der Industrie bestimmt. Für die Bewertung der Beschäftigungsstruktur im Verkehr wird anhand der sektoralen Eigenschaften abgeschätzt, in welchen Branchen die technologische Entwicklung noch unsicher ist sowie ob entweder starke direkte Abhängigkeit von P2X-Produkten als Kraftstoff (z.B. Luftfahrt) besteht oder die Betankungsinfrastruktur für betroffene Beförderungsmittel (bspw. Flughäfen, Tankstellen) bereitgestellt wird. Folgende Branchen wurden als wasserstoffrelevant klassifiziert:

- Personen-/Güterbeförderung
  - WZ 50 Schifffahrt
  - WZ 51 Luftfahrt
- Infrastruktur
  - WZ 52.22.2 Betrieb von Häfen
  - WZ 52.23.1 Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen für Luftfahrzeuge
  - WZ 47.3 Einzelhandel mit Motorenkraftstoffen (Tankstellen)
  - WZ 52.21.5 Betrieb von Güterabfertigungseinrichtungen für Schienen- und Straßenfahrzeuge (ohne Frachtumschlag)

Bei Personen- und Güterbeförderung in Schiff- und Luftfahrt ist es wichtig zu beachten, dass die Beschäftigung auf Landkreisebene nur schwer messbar ist. In der Statistik wird regionale Beschäftigung

[5] Der Kreisdurchschnitt beträgt im Originaldatensatz 2325 Beschäftigte, im vollständigen Datensatz 2270 Beschäftigte.

anhand des Betriebsortes zugeordnet (BA 2022). Während der Betriebsort in der Industrie klar regional definiert ist, weil jeder Produktionsort eine Betriebsstätte bildet, sind Betriebstätten im Verkehr eher durch Unternehmenssitz sowie etwaige Zweigniederlassungen, Geschäftsstellen und Ein- oder Verkaufsstellen gegeben (vgl. Definition der Betriebsstätte in §12 der Abgabenordnung). Damit ist zu erwarten, dass die Beschäftigung im Verkehr statistisch auf wenige Städte mit größeren Verkehrshubs konzentriert ist, wo die entsprechenden Unternehmen ihren Sitz haben, obwohl das eigentliche Verkehrsaufkommen über Deutschland und international aufgeteilt ist. In der Schiff- und Luftfahrt gehen alle Routen zwingend über Häfen und Flughäfen. Hier ist der vorgestellte Ansatz für die Bewertung der regionalen Beschäftigungsrelevanz im Kontext des Wasserstoffatlas unter Vorbehalt vertretbar.

Personen- und Güterbeförderung auf Straße und Schiene wurde dagegen aus der Bewertung ausgeschlossen, denn in diesem Fall besteht keine Bindung der Unternehmen und des Betriebs an bestimmte Verkehrshubs und die Diskrepanz zwischen dem gemeldeten und dem aktuellen Beschäftigungsort kann sehr groß sein. Darüber hinaus bestehen im Schienen- und Straßenverkehr im Gegenteil zum Schiff- und Luftverkehr große Unsicherheiten zur potentiellen Relevanz von Wasserstoff oder P2X-Alternativen im Vergleich zur direkten Elektrifizierung.

Neben den Verkehrsunternehmen werden auch die wichtigsten Betankungs- und Serviceorte als wasserstoffrelevant betrachtet. Neben den Tankstellenbetreibern, die in klimaneutraler Zukunft keine fossilbasierten Kraftstoffe mehr verkaufen, sondern Lademöglichkeiten für e-Fahrzeuge (zunehmend schon heute) sowie Wasserstoff und / oder e-Fuels bereitstellen werden, zählen hierzu auch Häfen, Flughäfen und Güterverkehrszentren (GVZ). Die letzteren sind Logistik-Zentren, wo Güter zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern (z.B. Straße, Schiene, Wasser) umgeladen und für (Weiter-)Transport vorbereitet werden (DGG kein Datum).

Es ist allerdings anzumerken, dass die Abgrenzung der Wasserstoffrelevanz in den entsprechenden WZ im Verkehr deutlich weniger scharf als in der Industrie erfolgt, weil die WZ im Verkehrssektor eine noch größere Breite an Tätigkeiten erfassen. Auch wenn Handel und Verpflegungsdienstleistungen sowie Frachtumschlag nicht unter die betrachteten WZ fallen, werden diverse Betriebsaktivitäten wie bspw. Flughafenkontrolle, Regelung und Überwachung des Flugverkehrs oder Feuerwehren und Brandbekämpfungsdienste auf Flughäfen unter dem jeweiligen Betrieb-WZ erfasst. Auch wenn für diese Tätigkeiten die Wasserstoffrelevanz fraglich sind, sind sie innerhalb des WZ nicht statistisch von den relevanten Aktivitäten trennbar. Daher ist es für den Verkehrssektor eine besonders starke Annahme, dass jeweils ganze Branchen wasserstoffrelevant sind, und die Ergebnisse müssen mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden.

## 3.3 Angebotsseitige Wasserstoffrelevanz

Die angebotsseitige Wasserstoffrelevanz soll für die 400 Landkreise in Deutschland angeben, wie ein regionales Produktionspotential von Wasserstoff bzw. P2X-Produkten für industrielle Anwendungen und den Verkehrssektor prinzipiell die Unsicherheiten hinsichtlich der notwendigen Substitution fossiler Energieträger reduzieren kann. Die angebotsseitige Relevanz wird durch das Überschusspotential der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen als Vielfaches der prognostizierten Stromnachfrage eines Landkreises quantifiziert. Die verwendeten Daten stammen aus Vorarbeiten der OTH Regensburg für den Wasserstoffatlas (OTH 2022).

Das Überschusspotential setzt sich aus dem technischen Potential der erneuerbaren Energien und der Stromnachfrage eines Kreises zusammen. Das technische Potential ergibt sich aus der technisch möglichen Stromerzeugung vor allem durch Windkraft- und Photovoltaikanlagen, bei vollständiger Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Flächen und unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windverhältnisse sowie der technischen Eigenschaften der Anlagen.[6] Bei der Flächenberechnung werden die bereits durch Siedlungen, Infrastruktur und Freiräume (Gewässer, Naturschutzgebiete, etc.) beanspruchten Flächen sowie die gesetzlichen und praxisüblichen Abstandsregelungen zu diesen Flächen berücksichtigt.

Das Überschusspotential ergibt sich dann als Differenz zwischen dem technischen Potential und dem Strombedarf des Kreises, so dass die Wasserstoffproduktion nicht in Konkurrenz zur Stromerzeugung für andere Zwecke steht. Die Höhe der Stromnachfrage wird aus den Prognosen der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. und Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH für Haushalte, Gewerbe, Industrie und Verkehr für das Jahr 2050 ermittelt (OTH 2022). Dabei wird das Nachfragewachstum berücksichtigt, das einerseits aus dem Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und andererseits aus der direkten Elektrifizierung im Zuge der Dekarbonisierung resultiert.

Da das Potential stark von der Fläche der Region abhängt, wird es zur besseren Vergleichbarkeit der angebotsseitigen Relevanz zwischen den Kreisen mit der Stromnachfrage der Kreise skaliert.

[6] Biomasse und Wasserkraft werden ebenfalls berücksichtigt, aber ihr technisches Potential ist bereits heute nahezu ausgeschöpft und wird daher zunächst auf den heutigen Ausbaustand beschränkt (OTH 2022).

# 4. Ergebnisse

## 4.1 Nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz

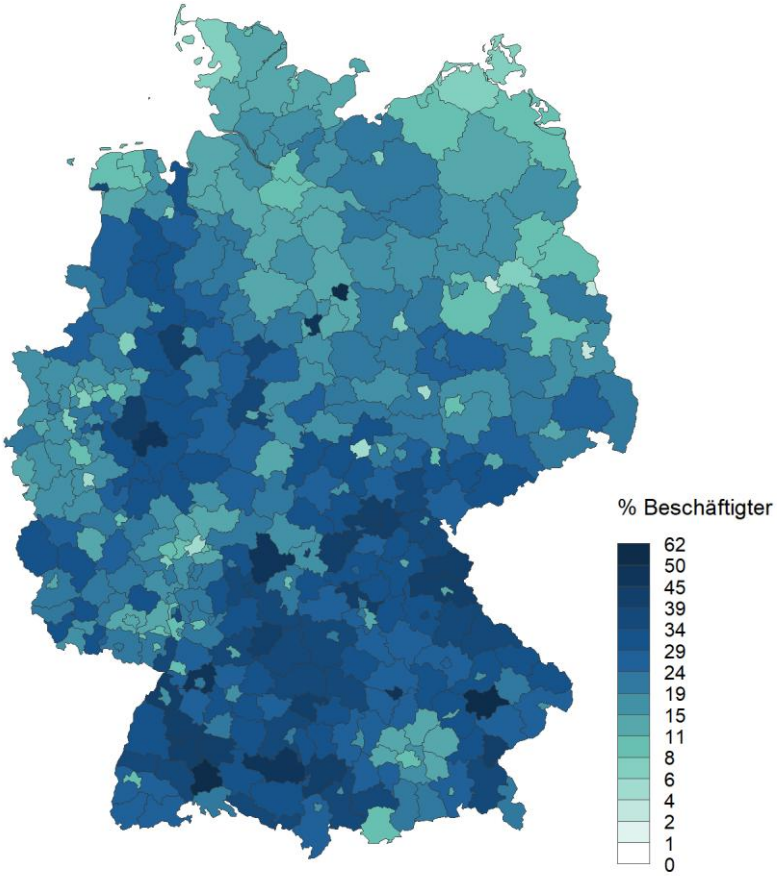
### 4.1.1 Industrie

Der Sektor der Industrie[7] erwirtschaftet eine Bruttowertschöpfung (BWS) von 637 Mrd. Euro. Das entspricht 20 % der bundesweiten BWS und liegt vier Prozentpunkte über dem europäischen Durchschnitt (Destatis 2023a) und vor Partnern wie Italien, Frankreich und Spanien. Auf 2-Steller-Ebene ist Industrie in 24 Branchen gegliedert. Die Branchen Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen (119 Mrd. Euro) und Maschinenbau (94 Mrd. Euro) sind bezüglich ihrer Wertschöpfung mit Abstand die bedeutendsten, gefolgt von den Branchen Herstellung von Metallerzeugnissen, Herstellung von DV-Geräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen, Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, Herstellung von chemischen Erzeugnissen und der Nahrungsmittelerzeugung mit jeweils ca. 50 Mrd. Euro Wertschöpfung.

In 2020 existierten in Deutschland etwa 47.000 Betriebe, die zusammen etwa 6,2 Millionen Erwerbstätige beschäftigten. Deutschlandweit sind etwa 22 % der Erwerbstätigen im Verarbeitenden Gewerbe beschäftigt, es gibt jedoch starke regionale Unterschiede (vgl. Abbildung 5). Während im Süden und Westen der Industrieanteil bei z.T. über 40 % liegt, sind im Osten und Norden weniger Beschäftigte in diesem Sektor angestellt. In etwa der Hälfte der Kreise liegt der Anteil zwischen 15 % und 30 % (vgl. die Häufigkeitsverteilung in Abbildung 17 im Anhang).

[7] In dieser Analyse wird unter Industrie das Verarbeitende Gewerbe verstanden.

**Abbildung 5: Anteil Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %)**




Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

Im Durchschnitt des Verarbeitenden Gewerbes liegt der Energieverbrauch bei rund 6 Terajoule (TJ) je 1 Mio. Euro Bruttowertschöpfung (vgl. Tabelle 1 im Anhang). Ausgenommen Kokereien und Mineralölerzeugung, die Endenergieträger für die weitere Verwendung erzeugen, sind die chemische Industrie (29 TJ je 1 Mio. Euro BWS), Herstellung von Papier und Pappe (25 TJ je 1 Mio. Euro BWS) und Herstellung von Glas und Keramik und Verarbeitung von Steinen und Erden (18 TJ je 1 Mio. Euro BWS) die drei energieintensivsten Branchen im Verarbeitenden Gewerbe, d.h. die Branchen mit dem höchsten relativen Energieverbrauch.

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, resultiert eine mögliche nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz aus den Risiken für die Beschäftigung in Branchen des Verarbeitenden Gewerbes, die Hochtemperaturprozesse einsetzen und / oder zukünftig Substitute für die stoffliche Nutzung von Energieträgern (zumeist Erdgas und Erdöl) benötigen.

Der Anteil an Energie, die für die Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt wird, unterscheidet sich zwischen den Branchen. Die drei Branchen mit dem höchsten Anteil an Prozesswärme am Energieverbrauch sind die Branchen Herstellung von chemischen Erzeugnissen (20-21), Herstellung von Glas und Keramik und Verarbeitung von Steinen und Erden (23) sowie die unterschiedlichen Branchen der

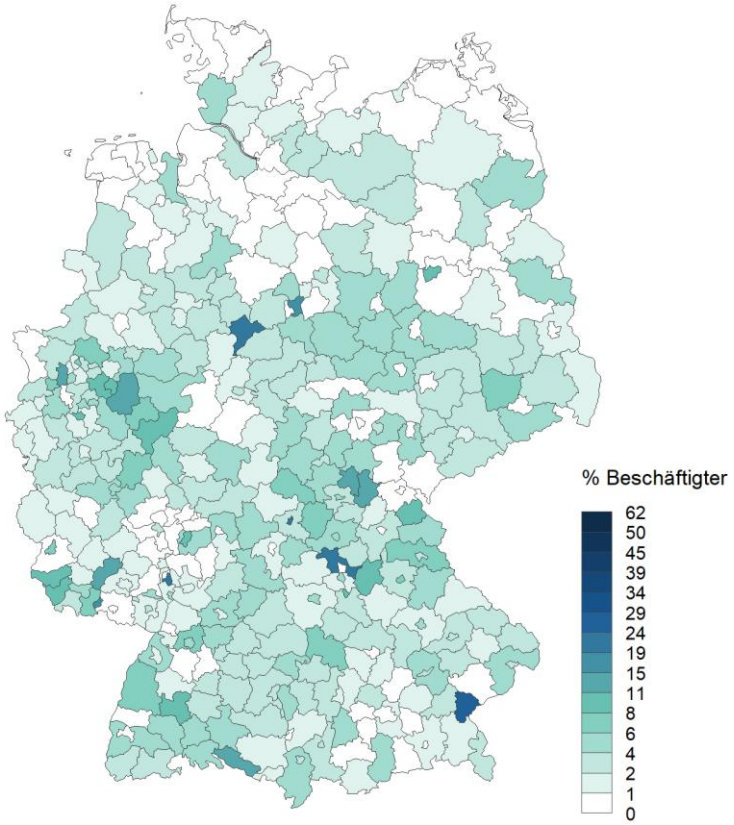
Metallerzeugung und -bearbeitung (24) und Herstellung von Metallerzeugnissen (25) (vgl. Tabelle 2 im Anhang). Weiterhin relevant, allerdings hinsichtlich der anteiligen Energiebedarfe mit geringerer Bedeutung, sind die Branchen Maschinenbau (28) und Fahrzeugbau (29 und 30). In Tabelle 3 im Anhang sind die Branchen auf 4-Steller Ebene aufgelistet, für die eine Substitution der fossilen Energieträger durch Wasserstoff und e-Fuels potentiell relevant wird.

Eine stoffliche Nutzung von fossilen Energieträgern erfolgt gegenwärtig vornehmlich in den Branchen der Grundstoffindustrien. Hierzu zählen der Energiesektor (Mineralölverarbeitung, 19), der Chemiesektor (20-21), wo organische Stoffe hauptsächlich aus Erdöl und Erdgas gewonnen werden, und die Branchen der Metallverarbeitung (24), wo vor allem Kohleprodukte zur Erzreduktion eingesetzt werden. In Tabelle 4 im Anhang sind die Branchen auf 4-Steller Ebene aufgezeigt, für die eine stoffliche Substitution des bisherigen Einsatzes von fossilen Energieträgern durch Wasserstoff und seine Derivative relevant ist.

Die Auswertung der Branchen für die 400 Landkreise und kreisfreien Städte (vgl. Abbildung 6) ergibt, dass 100 Kreise (25 %) eine betroffene Beschäftigung von unter 1 % der Gesamtbeschäftigung, 191 Kreise (48 %) unter 2 %, 253 Kreise (63 %) unter 3 % und 332 Kreise (83 %) unter 5 % aufweisen. Damit zeigt sich, dass für einen wesentlichen Teil der Regionen das direkte Risiko aus einer möglichen Substitution von fossilen Energieträgern in Hochtemperaturprozessen oder stofflicher Nutzung gering ist. Darüber hinaus gibt es aber Regionen, für die die Transformationsrisiken im verarbeitenden Gewerbe zu spürbaren Effekten auf die Beschäftigung führen können. In 53 Kreisen (13 %) liegt der Anteil betroffener Beschäftigung zwischen 5 % und 10 % der Gesamtbeschäftigung, in elf Kreisen (3 %) zwischen 10 % und 20 % und in vier Kreisen (1 %) über 20 %.

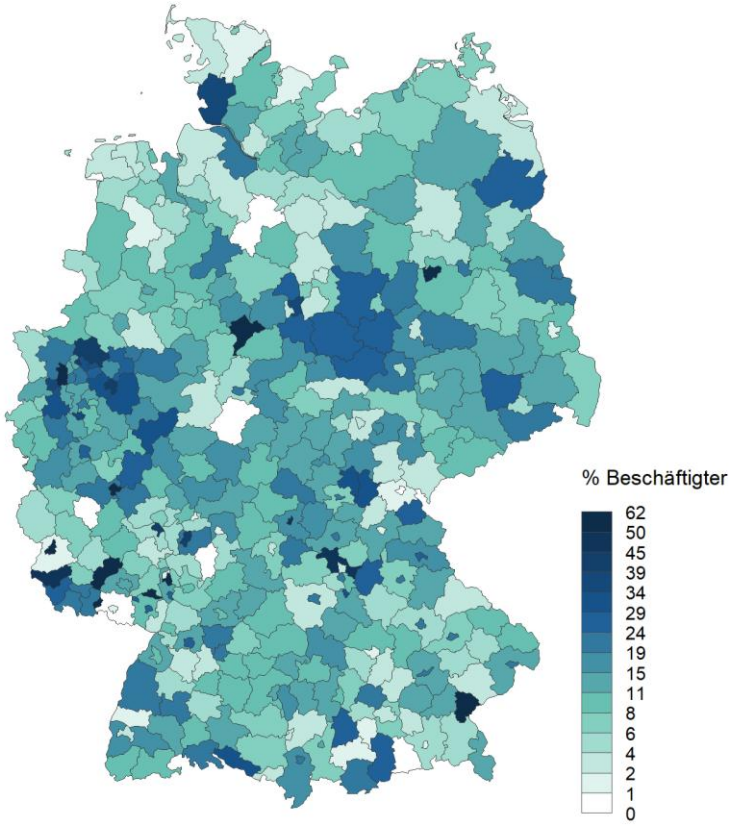
Eine Auswertung des Anteils betroffener Beschäftigung in der Industrie an der jeweiligen Gesamtbeschäftigung in der Industrie zeigt, dass in 80 % der Kreise eine Betroffenheit von unter 20 % besteht. Jedoch gilt für einige Kreise, dass durch die transformativen Risiken bis zu 62 % der Industriearbeitsplätze betroffen sein können (vgl. Abbildung 7).

**Abbildung 6: Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %)**




Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023).

**Abbildung 7: Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Industriebeschäftigung je Landkreis (in %)**

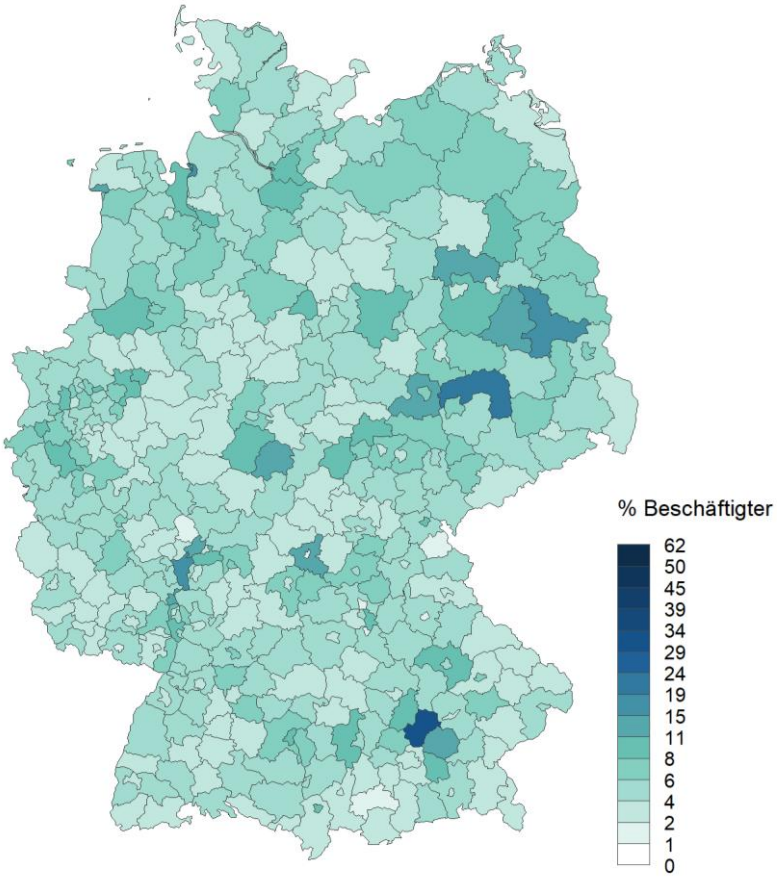



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023).

### 4.1.2 Verkehrssektor

In Deutschland sind knapp 2 Mio. Erwerbstätige im Sektor Verkehr und Lagerei beschäftigt. Im Gegensatz zur Industrie ist der Anteil der Beschäftigten in diesem Sektor an der Gesamtbeschäftigung relativ gering und liegt deutschlandweit bei knapp 6 %. In 95 % aller Kreise liegt der Anteil unter 10 %. Nur 19 Kreise mit Güterverkehrszentren, Häfen oder Flughäfen weisen einen Beschäftigungsanteil von über 10 % auf, wobei Freising (Standort des Flughafens München) mit 30 % den höchsten Wert aufweist (vgl. Abbildung 8).

**Abbildung 8: Anteil Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %)**

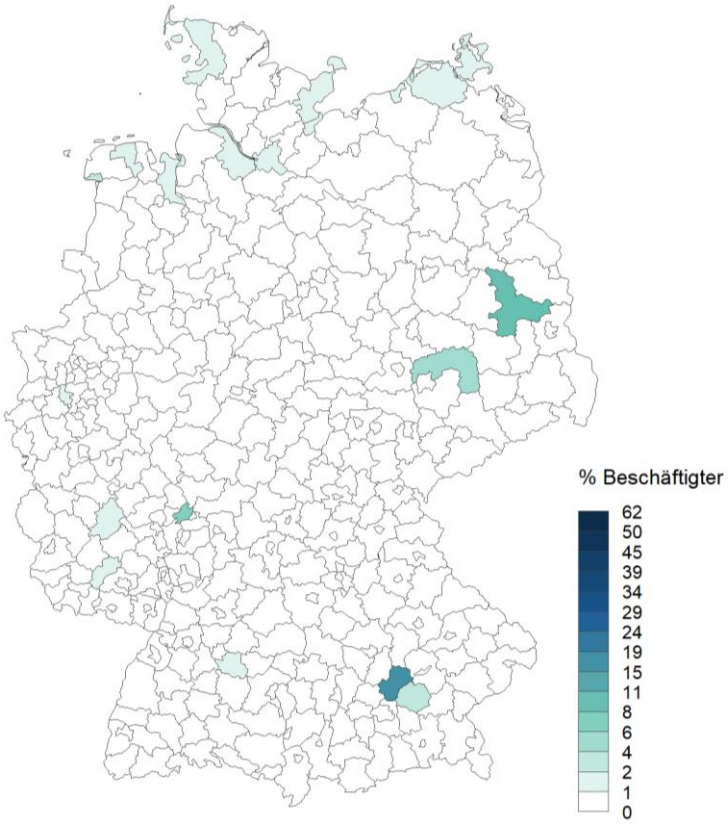



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023).

Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben sind hinsichtlich der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz die Branchen Personen- und Güterbeförderung, Betrieb von Luft- und Schifffahrt sowie Betrieb von Schiene und Straße von Interesse. Aufgrund der insgesamt geringeren Beschäftigungsrelevanz des Verkehrssektors in der deutschen Wirtschaft ist auch die betroffene Beschäftigung als Anteil an der regionalen Gesamtbeschäftigung mit meist unter 1 % sehr gering (vgl. Abbildung 9). Lediglich in 20 Kreisen (5 %) liegt der Anteil der betroffenen Beschäftigung höher. Besonders sichtbar sind die großen Flughäfen wie der Flughafen München (Freising, Anteil der betroffenen Beschäftigung knapp 19 %, und Erding, 3 %), Berlin-Brandenburg (Dahme-Spreewald, 8 %), Frankfurt am Main (7 %) und Leipzig

(Nordsachsen, 4 %). Die großen norddeutschen Häfen wie Bremerhaven (1,8 %), Rostock (1,7 %), Lübeck (1,5 %) und Hamburg (1,2 %) sind ebenfalls bemerkbar, wenn auch in geringerem Maße.

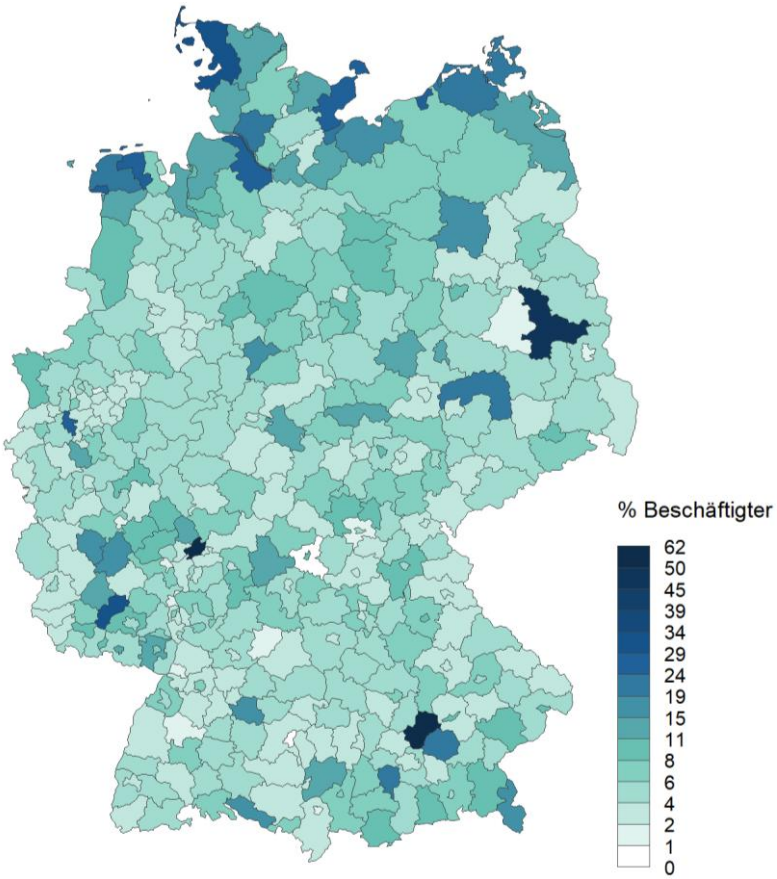
**Abbildung 9: Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %)**




Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023).

Der Anteil der betroffenen Beschäftigten in der Industrie an der Industriebeschäftigung ist mit mehreren Kreisen, in denen er unter 1 % liegt, aber auch mehreren, in denen er über 40 % liegt, regional sehr ungleich verteilt. Der Anteil der betroffenen Beschäftigten im Verkehr an der Gesamtbeschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei hingegen mit Ausnahme einiger Verkehrszentren relativ gleichmäßig verteilt (vgl. Abbildung 10). Dies ist auf eine gleichmäßige Verteilung der Beschäftigung in den Tankstellen zurückzuführen, die ein dichtes Netz über alle Kreise spannen. Kreise mit Häfen, Flughäfen und Güterverkehrszentren bilden dagegen eher eine Ausnahme. In fast zwei Dritteln der Kreise (251 Kreise, 63 %) liegt der Anteil der betroffenen Beschäftigten zwischen 1 % und 6 %, während nur zwei Kreise unter 1 % liegen. Weitere 100 Kreise (25 %) weisen einen Anteil zwischen 6 % und 11 % auf, 43 Kreise (11 %) liegen zwischen 11 % und 30 %, darunter auch einige Hafenstädte bzw. hafennahe Kreise wie Stade (26 %), Rostock (24 %) und Lübeck (22 %). Nur vier Kreise (1 %) liegen bei über 30 %, darunter drei Standorte der größten deutschen Flughäfen: Dahme-Spreewald (45 %), Frankfurt am Main (54 %) und Freising (62 %).

**Abbildung 10: Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei je Landkreis (in %)**

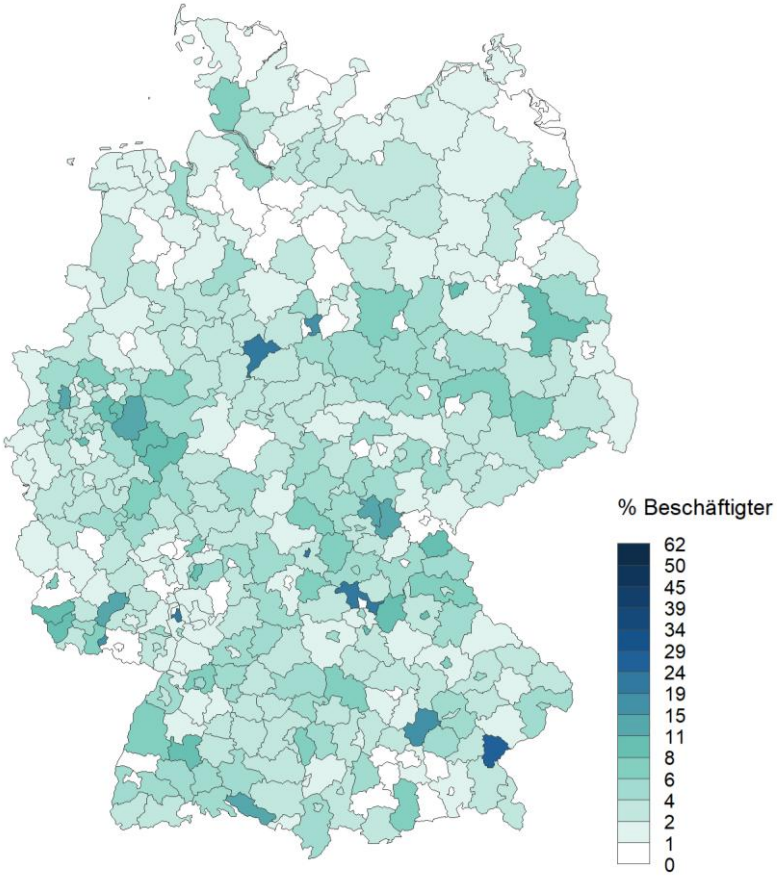



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023).

### 4.1.3 Aggregat der Sektoren Industrie und Verkehr

Der meist geringe Beitrag des Sektors Verkehr zur nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz führt dazu, dass das Aggregat der Sektoren Verkehr und Industrie im Wesentlichen von den oben diskutierten Ergebnissen des Industriesektors dominiert wird (vgl. Abbildung 11). Für die 400 Landkreise und kreisfreien Städte ergibt sich, dass 56 Kreise (14 %) eine betroffene Beschäftigung von unter 1 % der Gesamtbeschäftigung, 160 Kreise (40 %) unter 2 %, 226 Kreise (57 %) unter 3 % und 321 (80 %) unter 5 % aufweisen. Damit zeigt sich, dass für einen wesentlichen Teil der Regionen das direkte Risiko aus einer möglichen Substitution von fossilen Energieträgern in Industrie und Verkehr gering ist. Gleichzeitig gibt es Regionen, für welche die Transformationsunsicherheiten in den beiden Sektoren zu spürbaren Effekten auf die Beschäftigung führen können. In 63 Kreisen (16 %) liegt der Anteil betroffener Beschäftigung zwischen 5 % und 10 % der Gesamtbeschäftigung, in elf Kreisen (3 %) zwischen 10 % und 20 %, darunter ein Flughafenstandort, und in fünf Kreisen (1 %) über 20 %.

**Abbildung 11: Anteil betroffener Beschäftigung in den Sektoren Industrie sowie Verkehr an Gesamtbeschäftigung je Landkreis (in %)**



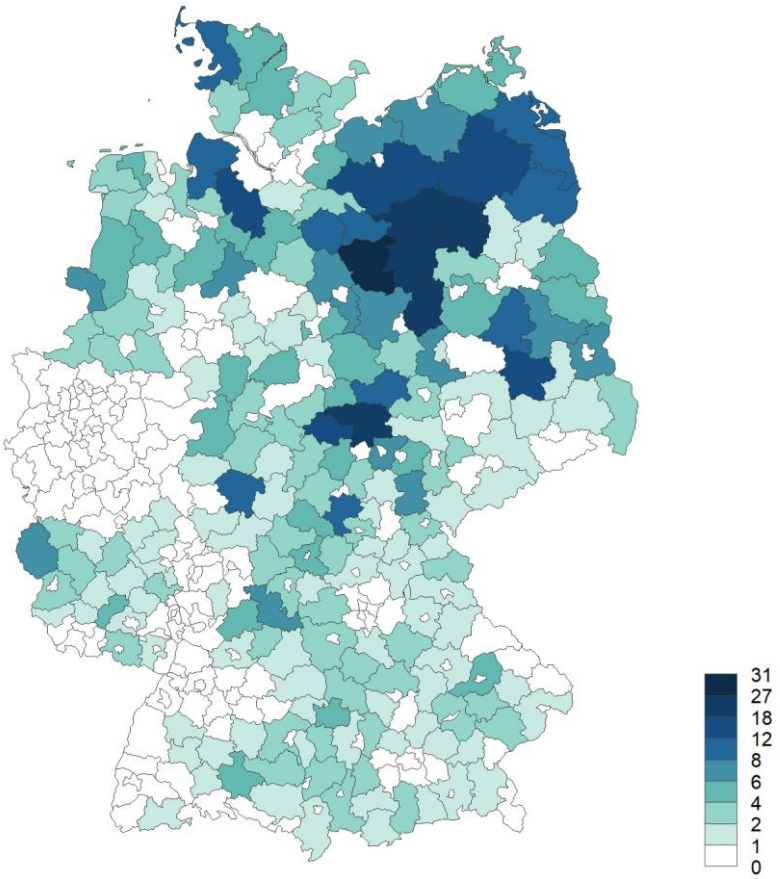

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023).

## 4.2 Angebotsseitige Wasserstoffrelevanz

Als Maß für die angebotsseitige Wasserstoffrelevanz wurde das Überschusspotential der erneuerbaren Stromerzeugung als Vielfaches der Stromnachfrage eines Kreises gewählt. Demnach weisen diejenigen Kreise hohe Potentialwerte auf, die (a) ein hohes technisches Potential zur regenerativen Stromerzeugung und (b) eine geringe Stromnachfrage aufweisen. Beides trifft vor allem auf die nördlichen Kreise zu. Aufgrund hoher Winderträge, geringerer Industrialisierung und niedrigerer Siedlungsdichte sind die Erträge höher und die Verbräuche niedriger als im Süden.

Abbildung 12 zeigt für die 400 Landkreise und kreisfreien Städte das Potential als Vielfaches der Stromnachfrage. In 101 (25 %) Kreisen beträgt das Potential nicht mehr als 10 % der Stromnachfrage. In weiteren 63 Kreisen (16 %) liegt das Potential zwischen 10 % und 50 % der Stromnachfrage und in weiteren 61 Kreisen (15 %) zwischen 50 % und 100 %. In 175 Kreisen (44 %) beträgt das Potential über 100 % der Nachfrage und erreicht sein Maximum beim 31-fachen der Stromnachfrage in Altmarkkreis Salzwedel.

**Abbildung 12: Wasserstoffpotential als Vielfaches der Stromnachfrage**




Eigene Darstellung basierend auf Schumm et al. (2024).

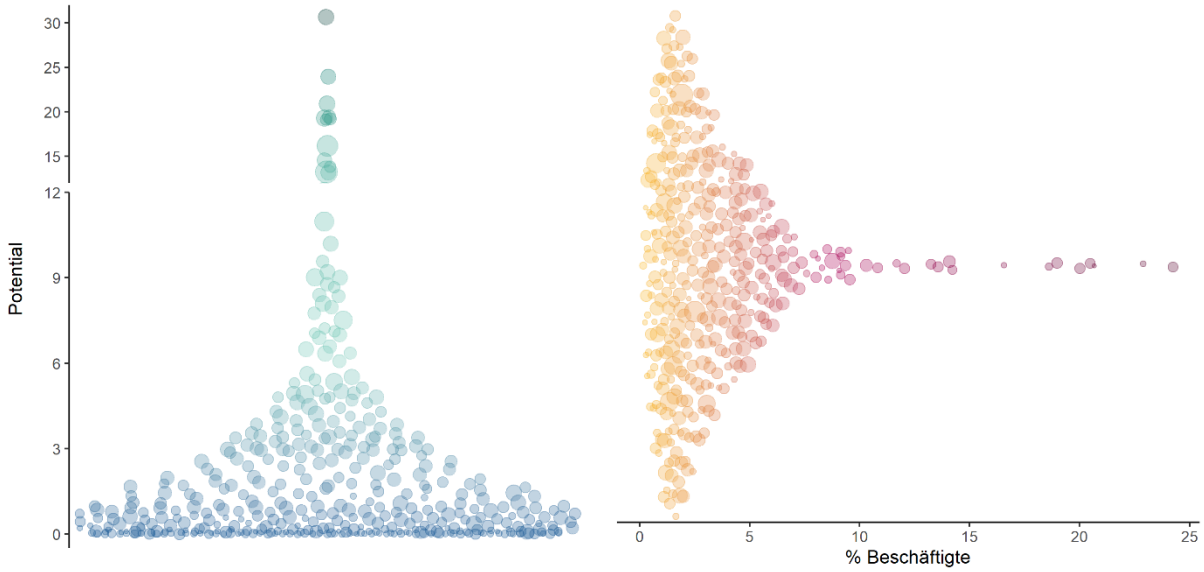
## 4.3 Mapping Chancen-Risiken-Matrix

Die Chancen-Risiken-Matrix stellt die angebots- und nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz gegenüber. Für die nachfrageseitige Relevanz wird dabei das Aggregat der Sektoren Industrie und Verkehr verwendet (vgl. Abschnitt 4.1.3), das die potentiellen Risiken mehrseitig abbildet.

Abbildung 13 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Wasserstoffpotentials (links) und der Nachfragerelevanz (rechts). Jeder Kreis in der Verteilung entspricht einem Landkreis bzw. einer kreisfreien Stadt, und größere Kreise entsprechen flächenmäßig größeren Regionen. Wie bereits oben beschrieben, häufen sich die Landkreise bzw. kreisfreien Städte sowohl beim Potential als auch bei der Nachfragerelevanz bei niedrigen Werten. Beim Wasserstoffpotential zeigt sich erwartungsgemäß eine Korrelation zwischen Gebietsfläche und Potential: Größere Landkreise sind in der Regel dünner besiedelt und weisen neben einer größeren verfügbaren Fläche für den Ausbau erneuerbarer Energien auch eine geringere Stromnachfrage und damit insgesamt ein höheres Potential auf. Hinsichtlich der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz lässt sich hingegen kein eindeutiger Trend erkennen. Die größeren Kreise weisen zwar eher selten eine sehr hohe oder sehr geringe Nachfragerelevanz auf, sind aber relativ gleichmäßig im niedrigen bis mittleren Bereich verteilt.

**Abbildung 13: Verteilung der Kreise nach Wasserstoffpotential und Nachfragerelevanz**

Wasserstoffpotential als Vielfaches der Stromnachfrage  Anteil betroffener Branchen an Gesamtbeschäftigung



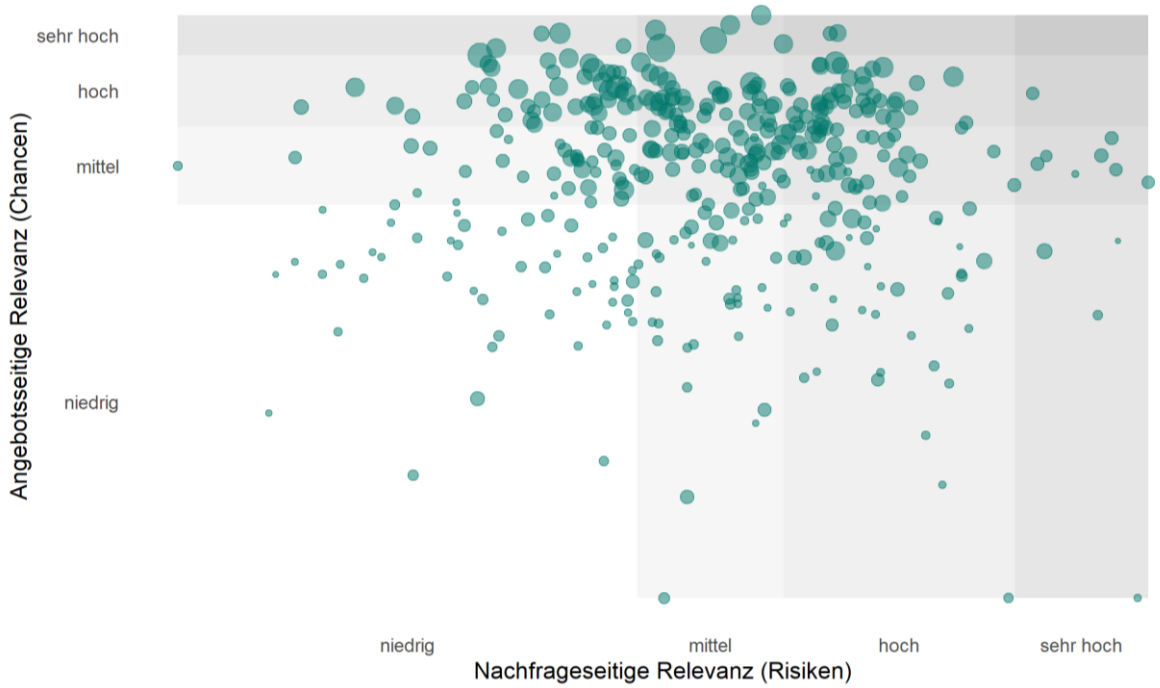

Anmerkung: Größe der Kreispunkte ist proportional zu deren Fläche gewählt.

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 14 ordnet alle Landkreise und kreisfreien Städte insgesamt 16 bivariaten Klassen zu, d.h. vier Klassen in jeder der beiden Dimensionen, die sich aus der Häufigkeitsverteilung der Kreise ergeben (vgl. Abschnitt 3.1). Die Chancen-Dimension entspricht dabei dem Potential für Wasserstofferzeugung (angebotsseitige Relevanz) und die Risiko-Dimension der nachfrageseitigen Relevanz. Eine Übersicht über die Klassen findet sich in Tabelle 5 im Anhang. Da sich die Landkreise sowohl bei der angebots- als auch bei der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz eher bei niedrigen Werten häufen, wird in der Matrix im Gegensatz zu Abbildung 13 eine logarithmische Skala verwendet. Die Größe der Kreise in der Abbildung variiert weiterhin mit der Fläche der Landkreise.

Deutlich erkennbar in der Chancen-Risiken-Matrix sind die kreisfreien Städte mit kleiner Fläche und geringen bis keinen Überschusspotentialen für die regenerative Stromerzeugung. Sie liegen überwiegend im unteren Drittel der Chancenverteilung („niedrig“ in Abbildung 14) und damit im unteren Bereich der Matrix, teilweise am unteren Rand. Darunter befinden sich Städte, die auch eine eher geringe Nachfragerelevanz aufweisen, wie z.B. München und Köln, aber auch Industriestandorte, die zukünftig potentiell einen sehr hohen Wasserstoffbedarf haben werden, wie Duisburg und Ludwigshafen. Größere Landkreise mit tendenziell höheren Erzeugungspotentialen aber moderatem Wasserstoffbedarf sind dagegen eher im oberen linken und mittleren Bereich der Matrix zu finden.

**Abbildung 14: Chancen-Risiken-Matrix (alle relevanten Branchen)**




Anmerkung: Die Daten sind in logarithmischer Skala abgebildet. Größe der Kreispunkte ist proportional zu deren Fläche gewählt.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023), Schumm et al. (2024).

Es zeigt sich auch, dass sich die Landkreise insgesamt eher in der Mitte der Matrix häufen, während „extreme“ Kombinationen mit Ausnahme der kreisfreien Städte eher selten sind. So gibt es z.B. keinen Kreis, der sowohl eine sehr hohe Nachfrage- als auch eine sehr hohe Angebotsrelevanz aufweist, nur einen Kreis (Kusel), der eine sehr hohe Nachfrage- und eine hohe Angebotsrelevanz aufweist, und nur zwei Kreise (Jerichower Land, Sömmerda), die eine hohe Nachfrage- und eine sehr hohe Angebotsrelevanz aufweisen. Dagegen sind Kreise mit einer sehr hohen Nachfrage- und einer mittleren Angebotsrelevanz (sieben Kreise) und Kreise einer mittleren Nachfrage- und einer sehr hohen Angebotsrelevanz (sechs Kreise) im Vergleich zu einer gleichmäßigen Verteilung etwas überrepräsentiert. Auch die Anzahl der Kreise, die in beiden Dimensionen in die niedrige Klasse (47 Kreise) oder die mittlere Klasse (48 Kreise) fallen, ist ein wenig höher, als bei einer gleichmäßigen Verteilung zu erwarten wäre.

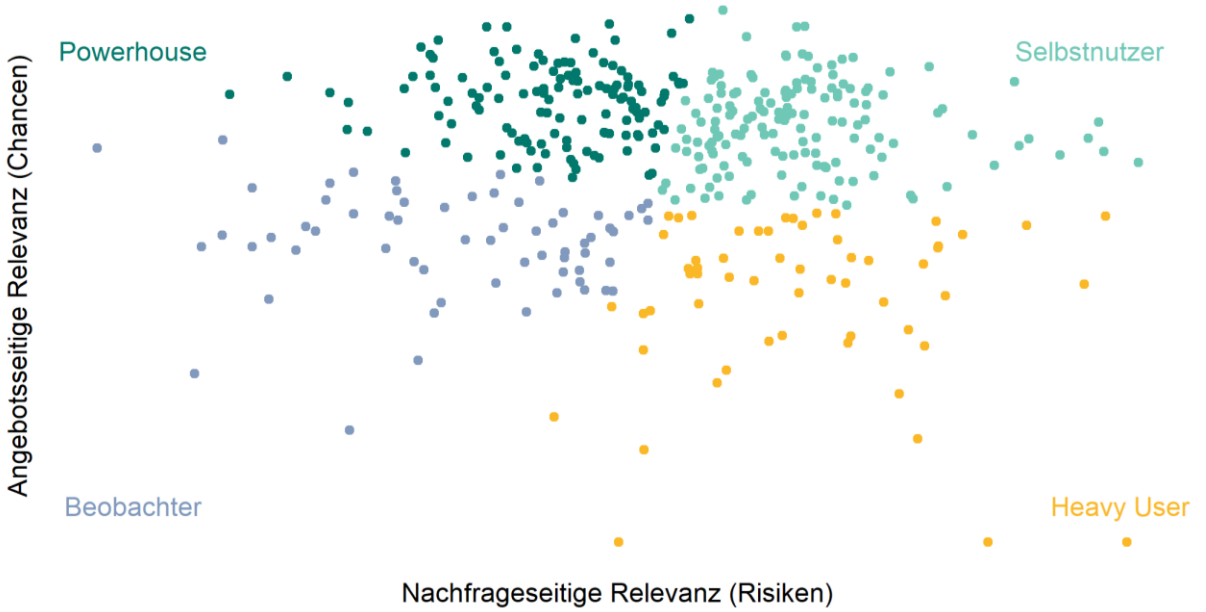
Die Chancen-Risiken-Matrix kann in Cluster geteilt werden, die unterschiedlichen Kreistypen entsprechen (vgl. Abbildung 15).[8] Diese werden hier als „Beobachter“, „Heavy User“, „Powerhouse“ und „Selbstnutzer“ definiert.

Zu den **Beobachtern** gehören 64 Kreise, die eine geringe Nachfrage- sowie Angebotsrelevanz aufweisen, darunter die bereits erwähnten kreisfreien Städte wie Berlin, München und Dresden. Während

[8] Die Clusterbildung erfolgte mittels eines k-Means-Algorithmus.

die Klimatransformation für sie an anderer Stelle Herausforderungen und Chancen darstellt, ist für sie kurzfristig weder der Aufbau einer Wasserstofferzeugung noch die Umstellung der industriellen Anwendungen und des Verkehrs auf Wasserstoff und e-Fuels besonders relevant. Dies könnte sich jedoch längerfristig ändern, wenn das Wasserstoffangebot wächst und Wasserstoffpreise sinken, so dass Wasserstoff und e-Fuels auch in anderen Anwendungen (z.B. Gebäudewärme) wettbewerbsfähig werden. Darüber hinaus kann für einige der Beobachterkreise aufgrund ihrer geografischen Lage der Wasserstofftransport in Zukunft an Bedeutung gewinnen (vgl. Abbildung 16 unten).

**Abbildung 15: Chancen-Risiken-Matrix nach Kreistypen**




Anmerkung: Die Daten sind in logarithmischer Skala abgebildet.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023), Schumm et al. (2024).

**Heavy User** sind 58 Kreise mit hoher Nachfragerelevanz aber geringem Erzeugungspotential. Dazu gehören die meisten Industriezentren wie Salzgitter, Ludwigshafen, Schweinfurt oder Duisburg. Sie werden in Zukunft voraussichtlich auf Wasserstoff angewiesen sein, können den Wasserstoffbedarf aber nicht aus eigener Erzeugung decken. Sie müssen nicht nur die Umstellung der Prozesse auf Wasserstoff vorantreiben, sondern auch für den Aufbau einer Importinfrastruktur sorgen. Da solche Investitionen in der Regel einen langen Vorlauf haben, müssen diese Kreise frühzeitig aktiv werden. Während die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in diesen Kreisen die Sicherung bestehender Arbeitsplätze unterstützt, sind darüber hinaus möglicherweise Maßnahmen erforderlich, um die Kompetenzen der Beschäftigten an die neuen Produktionsprozesse anzupassen.

**Powerhouse** sind dagegen 128 Landkreise mit hohem Wasserstofferzeugungspotenzial, aber geringer Wasserstoffnachfrage. Dies sind vor allem die großen und windreichen Kreise in Norddeutschland, die bereits heute zu den Stromexporteuren gehören. Durch den weiteren Ausbau regenerativer

Energieanlagen können sie ihr Exportpotential weiter steigern und ihre Wirtschaft stärken. Der Export kann dabei entweder direkt in Form von Strom erfolgen, der in räumlicher Nähe zu den Anwendungen in den Importkreisen zur Wasserstofferzeugung genutzt wird, oder durch den Ausbau von Elektrolysekapazitäten und Wasserstoff- bzw. P2X-Transport stattfinden. Die Frage, ob der Ausbau des Übertragungsnetzes aus techno-ökonomischer Sicht vorteilhafter ist als die Wasserstoffproduktion vor Ort und der anschließende Wasserstofftransport, bedarf jedoch einer vertieften Analyse und wird in dieser Studie nicht weiter diskutiert. Da die Powerhouse-Kreise jedoch tendenziell zu weniger industriell geprägten Kreisen gehören und eher weniger industriel geprägte Arbeitsmärkte aufweisen, könnte die lokale Nachfrage nach Fachkräften sowohl beim Ausbau der erneuerbaren Energien als auch der Elektrolysekapazitäten zu einem Engpass werden, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden.

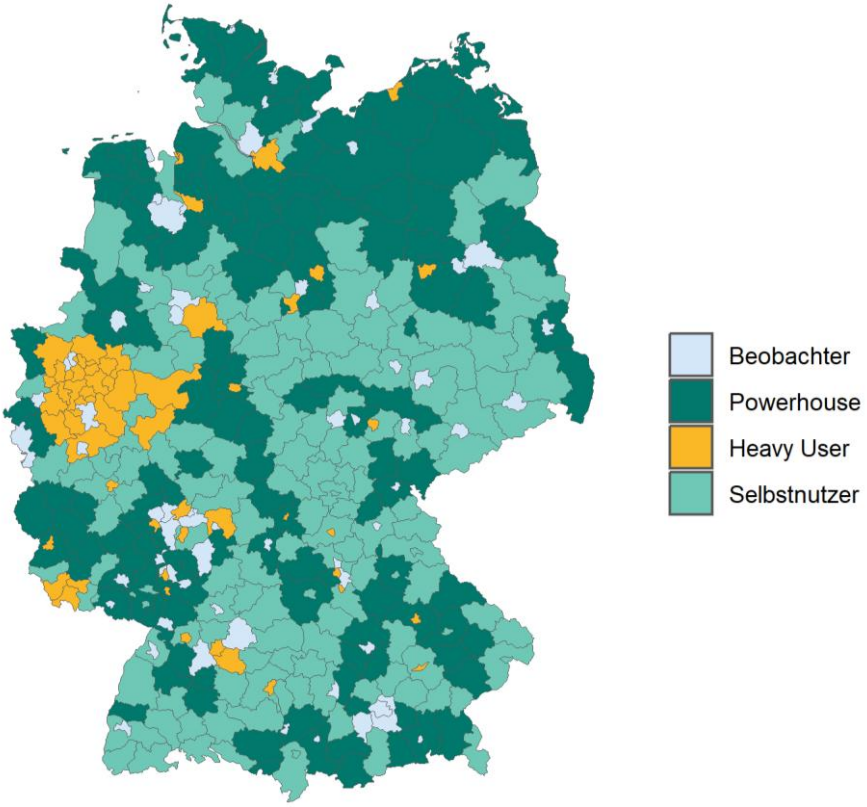
**Selbstnutzer** schließlich sind 150 Kreise, die sowohl eine relativ hohe Nachfragerelevanz als auch ein relativ hohes Potential aufweisen, wie z.B. der Landkreis Uckermark, Standort der Raffinerie Schwedt. Sie müssen ihre Produktionsprozesse auf Wasserstoff umstellen, haben aber auch das Potential, ihre Nachfrage durch ein regionales Angebot zu decken, wenn sie entsprechende Kapazitäten zur Wasserstofferzeugung vor Ort aufbauen. Ob dieses technische Potential jedoch auch wirtschaftlich zur Deckung der Nachfrage genutzt werden kann, ist eine techno-ökonomische und betriebswirtschaftliche Frage, die für jeden Kreis individuell beantwortet werden muss. Aus der Arbeitsmarktperspektive sind die Chancen und Herausforderungen der Wasserstoffwirtschaft für die Selbstnutzer sowohl denen von Heavy User als auch von Powerhouse-Kreisen häufig ähnlich. Auf der einen Seite trägt die Wasserstoffwirtschaft zur Sicherung bestehender Arbeitsplätze bei, auch wenn möglicherweise Kompetenzanpassungen erforderlich sind. Auf der anderen Seite ergeben sich durch das hohe Produktionspotenzial Chancen in neuen Geschäftsmodellen. Dafür wird jedoch vorausgesetzt, dass genügend Fachkräfte für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zur Verfügung stehen.

Abbildung 16 stellt die 400 Landkreise und kreisfreien Städte nach ihrer Verordnung in der Chancen-Risiken-Matrix in der räumlichen Dimension dar. Erwartungsgemäß befinden sich die Powerhouse-Kreise vor allem in Norddeutschland und Heavy User im großen Industriecluster im Westen sowie meist als Einzelhubs im Süden. Es gibt jedoch auch kleinere Powerhouse-Cluster in der Nähe der Industriezentren. Dort befinden sich vor allem auch potentialreiche Landkreise, die einen Umland für importabhängige kreisfreie Städte bilden, wie z.B. die Städte und die Landkreise Schweinfurt, Kassel und Trier (Trier-Saarburg), die Städte Speyer und Ludwigshafen und der Rhein-Pfalz-Kreis.

Die Selbstnutzerkreise sind in allen Regionen Deutschlands zu finden. Zusammen mit den Beobachtern, die meist einzeln oder in kleinen Gruppen ebenfalls in überall in Deutschland verteilt sind, bilden sie oft eine lokale oder überregionale Brücke zwischen Powerhouse und Heavy User. Lokal sind

Beobachter- und Selbstnutzerkreise, die Heavy User umschließen, vor allem in Rheinland-Pfalz und Bayern (z.B. Stadt Koblenz mit Landkreis Mayen-Koblenz als Umland, Stadt Darmstadt mit Landkreis Darmstadt-Dieburg, Stadt Schwabach mit Landkreis Roth) zu finden. Überregional liegen große Selbstnutzer- und Beobachtercluster zwischen Powerhouse- und Heavy User Clustern in Rheinland-Pfalz bzw. teilweise in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. Auch wenn hier die Bewertung für jeden Kreis ebenfalls individuell erfolgen muss, ist davon auszugehen, dass viele dieser Kreise Teil der Wasserstofftransportinfrastruktur werden. Einen guten Vergleich bietet die Planung der kritischen Wasserstoffinfrastruktur, vor allem der Fernleitungen, durch die European Hydrogen Backbone (EHB) Initiative. Die Wasserstoffpipelines, die nach der EHB-Vision bis 2040 in Deutschland entstehen sollen (vgl. Abbildung 25 im Anhang), verlaufen größtenteils direkt über die in Abbildung 16 erkennbaren Powerhouse-Heavy User-Achsen.

**Abbildung 16: Kreise nach Verordnung in der Chancen-Risiken-Matrix**




Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BA (2023), Schumm et al. (2024).

# 5. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Analyse war es, die Arbeitsmarktperspektive in den Wasserstoffatlas Deutschland einzubringen und die angebots- und nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz mit Fokus auf die Beschäftigung im regionalen Kontext abzubilden und einander gegenüberzustellen. Zur Darstellung der Beschäftigungsrelevanz der potentiellen zukünftigen Wasserstoffnachfrage wurden wasserstoffrelevante Branchen in Industrie und Verkehr identifiziert und der Gesamtbeschäftigung auf Kreisebene gegenübergestellt. Die angebotsseitige Wasserstoffrelevanz wurde auf Basis des Wasserstoffatlas Deutschland als Potential der Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien quantifiziert.

Die Analyse der nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz zeigt, dass der Anteil der nachfrageseitig von der Wasserstoffwirtschaft betroffenen Beschäftigung in einem Großteil der Kreise mit unter 5 % relativ gering ist. Es gibt jedoch auch Regionen, vor allem in den industriellen Clustern West- und Süddeutschlands, in denen bis zu ein Viertel der Beschäftigten potentiell betroffen sind.

Die angebotsseitige Wasserstoffrelevanz ist dagegen in Norddeutschland besonders hoch, so dass voraussichtlich innerdeutsche Wasserstofftransporte zukünftig eine große Rolle spielen dürften. Aus der Arbeitsmarktperspektive bedeuten die hohen Erzeugungspotentiale in Norddeutschland einerseits, dass von der Wasserstoffproduktion starke regionalwirtschaftliche Impulse ausgehen könnten, andererseits, dass die damit verbundene Nachfrage nach Fachkräften potentiell zu einem Engpass werden könnte.

Aus der Gegenüberstellung der angebots- und nachfrageseitigen Wasserstoffrelevanz wurden die vier Kreistypen Beobachter, Heavy User, Powerhouse und Selbstnutzer definiert, die im Zuge der Klimatransformation in unterschiedlicher Weise von der Wasserstoffwirtschaft betroffen sein werden. Aus diesen Kreistypen ergeben sich unterschiedliche Bereiche, in denen die Kreise tendenziell aktiv werden müssen, um die Herausforderungen der Klimatransformation zu meistern und die Chancen der Wasserstoffwirtschaft zu nutzen.

Jeder Kreis ist jedoch individuell. Die vorliegende Analyse gibt einen ersten Einblick in mögliche regionale Chancen und Unsicherheiten bezüglich der Wasserstoffwirtschaft, zeigt Trends auf und regt die Stakeholder an, über die Rolle von Wasserstoff in ihrem Kreis zu reflektieren. Sie ersetzt jedoch nicht die strategische Vision des Kreises oder die technische und wirtschaftliche Planung konkreter Projekte.

# Literaturverzeichnis

Ariadne Projekt. 2021. „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich." https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/.

BA. 2023. *Beschäftigungsstatistik, Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (SvB) am Arbeitsort Insgesamt und in ausgewählten Branchen (Cluster der WZ 2008).* Bundesagentur für Arbeit.

BA. 2022. *Grundlagen: Qualitätsbericht – Statistik der sozialversicherungspflichtigen und geringfügigen Beschäftigung.* Nürnberg: Bundesagentur für Arbeit.

Blommaert, Quentin. 2021. *Wärmewende – Auf Betriebstemperatur.* Dezember. Zugriff am 25. April 2023. https://www.marketsinternational.de/waermewende/.

BMBF. kein Datum. „P2X: Erneuerbare Energie umwandeln und speichern." Bundesministerium für Bildung und Forschung. https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/p2x-erneuerbare-energie-umwandeln-und-speichern.html.

BMJ. kein Datum. *Bundes-Klimaschutzgesetz.*

Destatis. 2023c. „Energieverbrauch: Deutschland, Jahre, Produktionsbereiche." https://www-genesis.destatis.de/genesis/online#astructure.

—. 2023a. „Industrie, Handel, Dienstleistungen." https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Industrie-Handel-Dienstleistungen/_inhalt.html.

—. 2023b. „Inlandsproduktberechnung - Detaillierte Jahresergebnisse (vorläufige Ergebnisse) - Fachserie 18 Reihe 1.4 - 2022 (Rechenstand: Februar 2023)." https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-18.html#152686.

DGG. kein Datum. *Was ist ein Güterverkehrszentrum?* Zugriff am 24. April 2023. https://www.gvz-org.de/de/g%C3%BCterverkehrszentren/.

Die Bundesregierung. 2023. *Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie - NWS 2023.* Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Juli.

Fraunhofer ISI. 2022. „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD."

Fraunhofer ISI et al. 2024. *Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands.* Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Consentec GmbH, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Lehrstuhl für Energie- und Ressourcenmanagement der TU Berlin. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/.

Frisch, S., M. Pehnt, P. Otter, und M. Nast. 2010. *Prozesswärme im Marktanreizprogramm. Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms FKZ 03MAP123.* Heidelberg, Stuttgart: ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

IEA. 2022. *ETP Clean Energy Technology Guide.* https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?country=+Germany.

IFEU. 2010. „Prozesswärme im Marktanreizprogramm."

Kopernikus-Projekt Ariadne. 2021. „Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich." doi:https://doi.org/10.48485/pik.2021.006.

Maaß, Christian, Matthias Sandrock, und Gerrit Fuß. 2018. *Strategische Optionen zur Dekarbonisierung und effizienteren Nutzung der Prozesswärme und -kälte.* Hamburg Institut.

Naegler, Tobias, Sonja Simon, Hans Christian Gils, und Martin Klein. 2016. „Potenziale für erneuerbare Energien in der industriellen Wärmeerzeugung." *BWK*, 1. Juni: 20-24.

OTH. 2022. *Wasserstoffatlas Deutschland: Methodik. Version 1.0.* Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.

Samadi, Sascha. 2022. *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland.* März. Zugriff am 25. April 2023. https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/samadi-2022-vergleich-aktueller-klimaschutzszenarien-fuer-deutschland-cr-sci4climatenrw.pdf.

Schumm, Leon, Falk Birett, Andreas Hofrichter, Valentin Heusgen, und Stefan Rahim. 2024. *Wasserstoffatlas (Hydrogen Atlas) Dataset. Version v6.* 22. Januar. https://zenodo.org/records/8207466.

Sensfuß, F., B. Lux, Ch. Bernath, Ch. Kiefer, B. Pfluger, Ch. K., K. Franke, et al. 2022. „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland." https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/.

Statistisches Bundesamt. 2022. *Energieverbrauch der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Nutzung des Energieverbrauchs, Wirtschaftszweige, Energieträger. Energieverwendung der Betriebe im Verarb. Gewerbe.*

# Anhang A. Sektorenübersichten

**Tabelle 1: Strukturdaten zum Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland**

| Code WZ08 | Sektor | Betriebe | Tätige Personen | Bruttowert-schöpfung, Mrd. Euro | Energie-verbrauch, TJ | Energieinten-sität, TJ/Mio. Euro |
|---|---|---|---|---|---|---|
| C | Verarbeitendes Gewerbe (C) | 46 535 | 6 211 619 | 637 | 3 903 850 | 6,13 |
| 10 | H. v. Nahrungs- und Futtermitteln | 5 598 | 552 202 | 51 | 302 793 | 5,94 |
| 11 | Getränkeherstellung | 565 | 61 834 | | | |
| 12 | Tabakverarbeitung | 24 | 7 484 | | | |
| 13 | H. v. Textilien | 693 | 59 812 | 7 | 25 870 | 3,80 |
| 14 | H. v. Bekleidung | 218 | 26 186 | | | |
| 15 | H. v. Leder, Lederwaren und Schuhen | 131 | 12 757 | | | |
| 16 | H. v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren | 1 155 | 87 801 | 9 | 113 528 | 12,40 |
| 17 | H. v. Papier, Pappe und Waren daraus | 900 | 129 914 | 11 | 291 022 | 25,54 |
| 18 | H. v. Druckerzgn. Vervielf. v. Ton-, Bild-, Datenträger | 1 260 | 87 288 | 7 | 23 634 | 3,47 |
| 19 | Kokerei und Mineralölverarbeitung | 67 | 18 784 | 2 | 545 270 | 270,07 |
| 20 | H. v. chemischen Erzeugnissen | 1 706 | 348 918 | 49 | 1 446 276 | 29,29 |
| 21 | H. v. pharmazeutischen Erzeugnissen | 355 | 115 519 | 25 | 80 418 | 3,21 |
| 22 | H. v. Gummi- und Kunststoffwaren | 3 370 | 389 450 | 30 | 138 471 | 4,66 |
| 23 | H. v. Glaswaren, Keramik, Verarb. v. Steinen u. Erden | 3 311 | 192 903 | 19 | 353 799 | 18,44 |
| 24 | Metallerzeugung und -bearbeitung | 1 060 | 244 279 | 18 | 136 620 | 7,59 |
| 25 | H. v. Metallerzeugnissen | 8 261 | 669 416 | 53 | | |
| 26 | H. v. DV-Geräten., elektron. u. optischen Erzeugn. | 2 016 | 316 624 | 42 | 50 032 | 1,18 |
| 27 | H. v. elektrischen Ausrüstungen | 2 303 | 411 144 | 43 | 45 638 | 1,06 |
| 28 | Maschinenbau | 6 393 | 1 041 331 | 94 | 112 594 | 1,20 |
| 29 | H. v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen | 1 361 | 817 031 | 119 | 161 332 | 1,36 |
| 30 | Sonstiger Fahrzeugbau | 369 | 143 187 | 13 | 17 828 | 1,34 |
| 31 | H. v. Möbeln | 997 | 99 172 | 27 | 33 777 | 1,25 |
| 32 | H. v. sonstigen Waren | 1 843 | 172 664 | | | |
| 33 | Rep. u. Installation v. Maschinen und Ausrüstung | 2 579 | 205 919 | 17 | 24 948 | 1,48 |

Quellen: Destatis (2023b), Destatis (2023c).

**Tabelle 2: Anteil Prozesswärme am Energieverbrauch und Anteil Höchsttemperatur an Prozesswärme**

| Code WZ08 | Sektor | Anteil Prozesswärme am Energieverbrauch | Anteil Hochtemperatur (> 500°C) an Prozesswärme |
|---|---|---|---|
| 20 -21 | Herstellung von chemischen Erzeugnissen | 62 % - 74 % | 62 % |
| 23 | Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden | 75 % | 97 % |
| 24 | Metallerzeugung und -bearbeitung | 31 % - 90 % | 98 % |
| 25 | Herstellung von Metallerzeugnissen | | 45 % |
| 26 | Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen | ca. 10 % | 46 % |
| 27 | Herstellung von elektrischen Ausrüstungen | ca. 10 % | 44 % |
| 28 | Maschinenbau | 13 % | 45 % |
| 29 | Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen | 33 % | 44 % |
| 30 | Sonstiger Fahrzeugbau | | 44 % |
| 31 | Herstellung von Möbeln | ca. 10 % | 11 % |
| 32 | Herstellung von sonstigen Waren | ca. 10 % | 11 % |

Quelle: Fraunhofer ISI (2022), IFEU (2010).

**Tabelle 3: Sektoren mit relevanter Unsicherheit der Energieträgersubstitution in Hochtemperaturprozessen**

| WZ-Nr. | WZ-Bezeichnung |
|---|---|
| 19.20 | Mineralölverarbeitung |
| 20.11 | Herstellung von Industriegasen |
| 20.12 | Herstellung von Farbstoffen und Pigmenten |
| 20.13 | Herstellung von sonstigen anorganischen Grundstoffen und Chemikalien |
| 20.14 | Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien |
| 20.15 | Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen |
| 23.11 | Herstellung von Flachglas |
| 23.12 | Veredlung und Bearbeitung von Flachglas |
| 23.13 | Herstellung von Hohlglas |
| 23.14 | Herstellung von Glasfasern und Waren daraus |
| 23.19 | Herstellung, Veredlung und Bearbeitung von sonstigem Glas, technischen Glaswaren |
| 23.20 | Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren |
| 23.31 | Herstellung von keramischen Wand- und Bodenfliesen und -platten |
| 23.32 | Herstellung von Ziegeln und sonstiger Baukeramik |
| 23.41 | Herstellung von keramischen Haushaltswaren und Ziergegenständen |
| 23.42 | Herstellung von Sanitärkeramik |
| 23.43 | Herstellung von Isolatoren und Isolierteilen aus Keramik |
| 23.44 | Herstellung von keramischen Erzeugnissen für sonstige technische Zwecke |
| 23.49 | Herstellung von sonstigen keramischen Erzeugnissen |
| 23.51 | Herstellung von Zement |
| 23.52 | Herstellung von Kalk und gebranntem Gips |
| 23.91 | Herstellung von Schleifkörpern und Schleifmitteln auf Unterlage |
| 23.99 | Herstellung von sonstigen Erzeugnissen aus nichtmetallischen Mineralien a.n.g. |
| 24.10 | Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen |
| 24.20 | Herstellung von Stahlrohren und Rohrstücken aus Stahl |
| 24.31 | Herstellung von Blankstahl |

| | |
|---|---|
| 24.41 | Erzeugung und erste Bearbeitung von Edelmetallen |
| 24.42 | Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium |
| 24.43 | Erzeugung und erste Bearbeitung von Blei, Zink und Zinn |
| 24.44 | Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer |
| 24.45 | Erzeugung und erste Bearbeitung von sonstigen NE-Metallen |
| 24.46 | Aufbereitung von Kernbrennstoffen |
| 25.40 | Herstellung von Waffen und Munition |
| 25.50 | Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh-, Stanzteilen und Ä. |
| 25.61 | Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung |
| 25.94 | Herstellung von Schrauben und Nieten |
| 26.52 | Herstellung von Uhren |
| 27.20 | Herstellung von Batterien und Akkumulatoren |
| 28.14 | Herstellung von Armaturen a.n.g. |
| 28.15 | Herstellung von Lagern, Getrieben, Zahnrädern, Antriebselementen |
| 28.91 | Herstellung von Maschinen für Metallerzeugung, Walzwerkseinrichtungen usw. |
| 29.31 | Herstellung von elektrischen und elektronischen Ausrüstungen für Kraftwagen |
| 30.40 | Herstellung von militärischen Kampffahrzeugen |

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

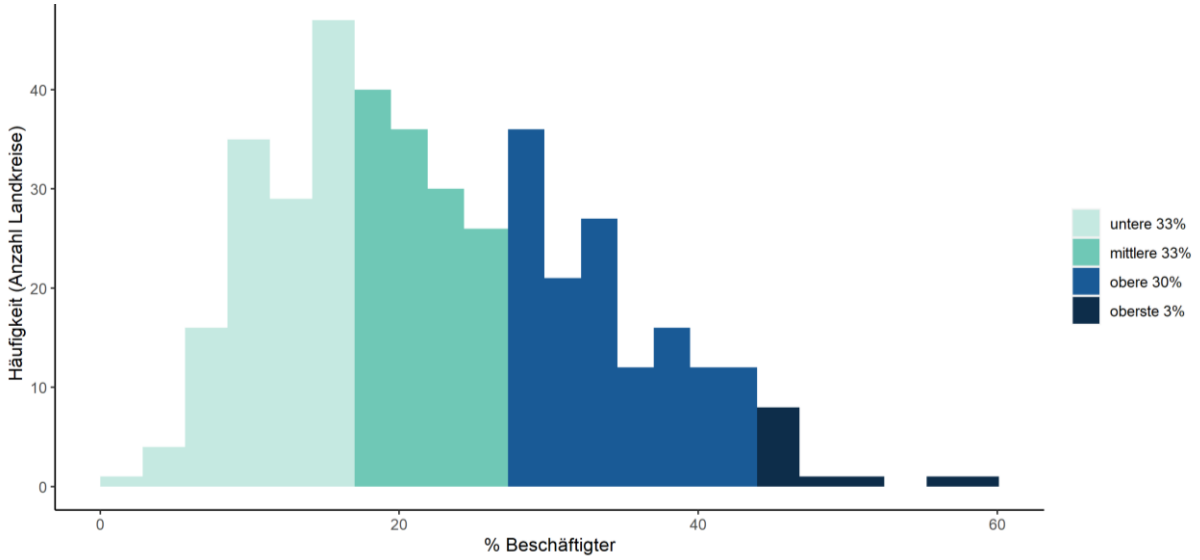
**Tabelle 4: Sektoren mit relevanter Unsicherheit der Energieträgersubstitution in stofflicher Nutzung von fossilen Quellen**

| WZ-Nr. | WZ-Bezeichnung |
|---|---|
| 19.20 | Mineralölverarbeitung |
| 20.11 | Herstellung von Industriegasen |
| 20.14 | Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien |
| 21.10 | Herstellung von pharmazeutischen Grundstoffen |
| 24.10 | Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen |
| 24.43 | Erzeugung und erste Bearbeitung von Blei, Zink und Zinn |
| 24.44 | Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer |
| 24.45 | Erzeugung und erste Bearbeitung von sonstigen NE-Metallen |
| 25.61 | Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung |

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

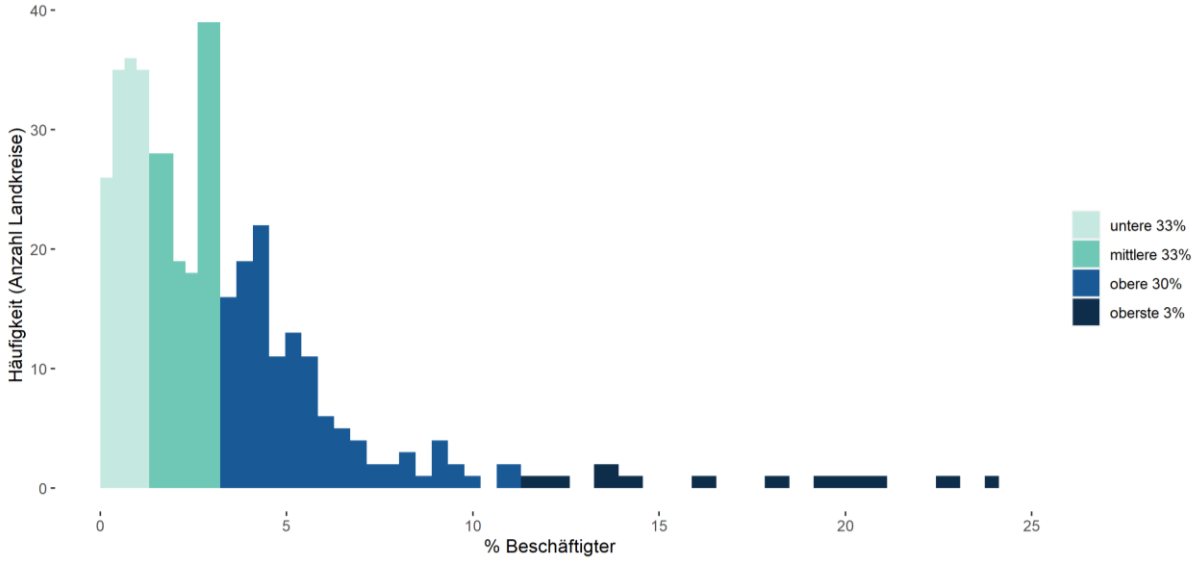
# Anhang B. Ergebnisse

**Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung Anteil Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis**



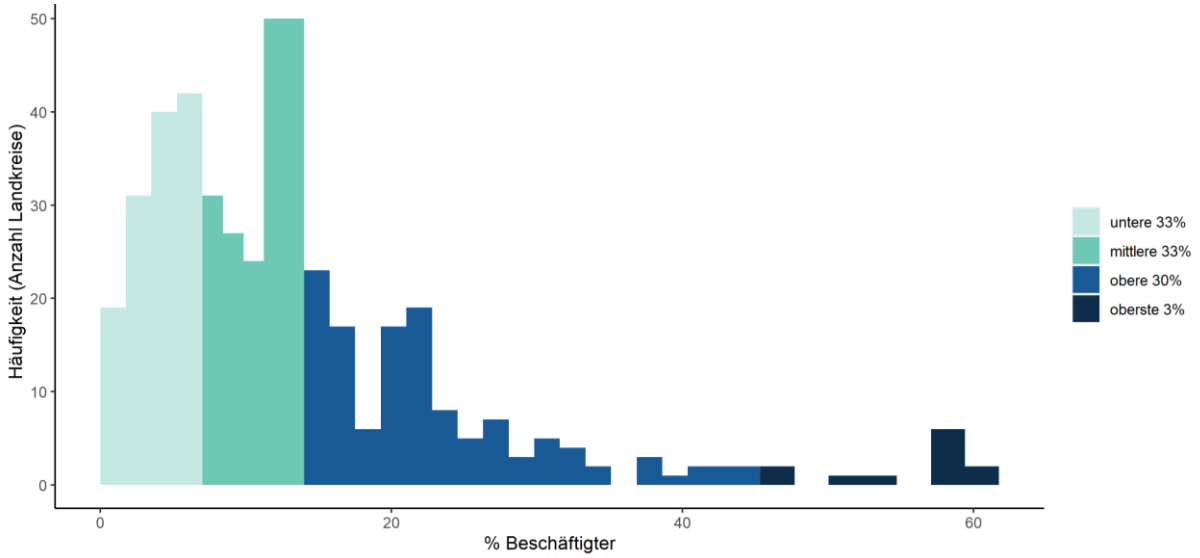

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Gesamtbeschäftigung je Landkreis**



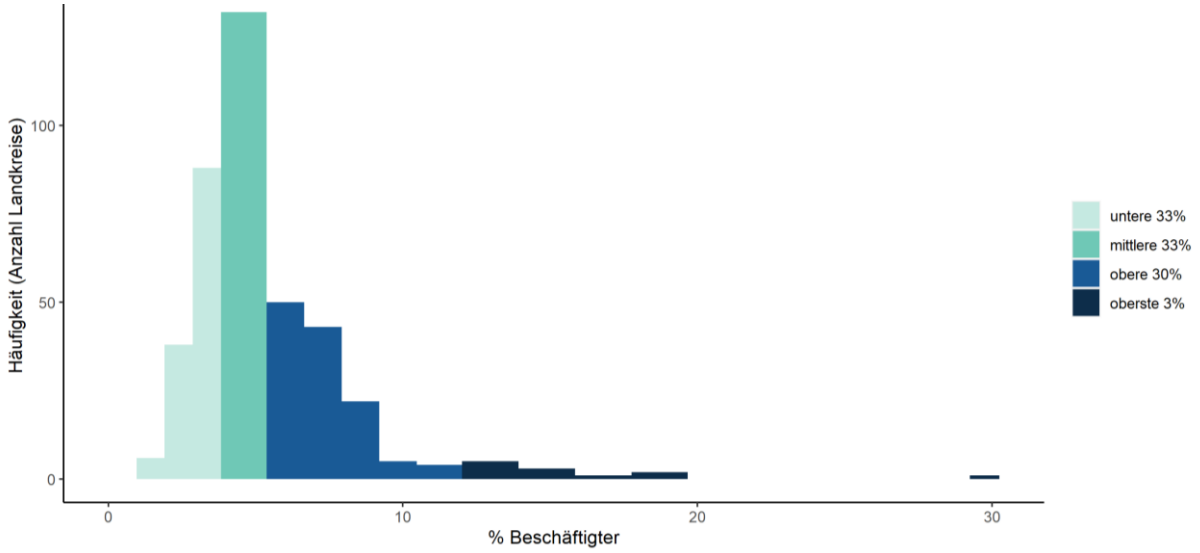

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 19: Häufigkeitsverteilungen Anteil betroffener Beschäftigung in der Industrie an Industriebeschäftigung je Landkreis**



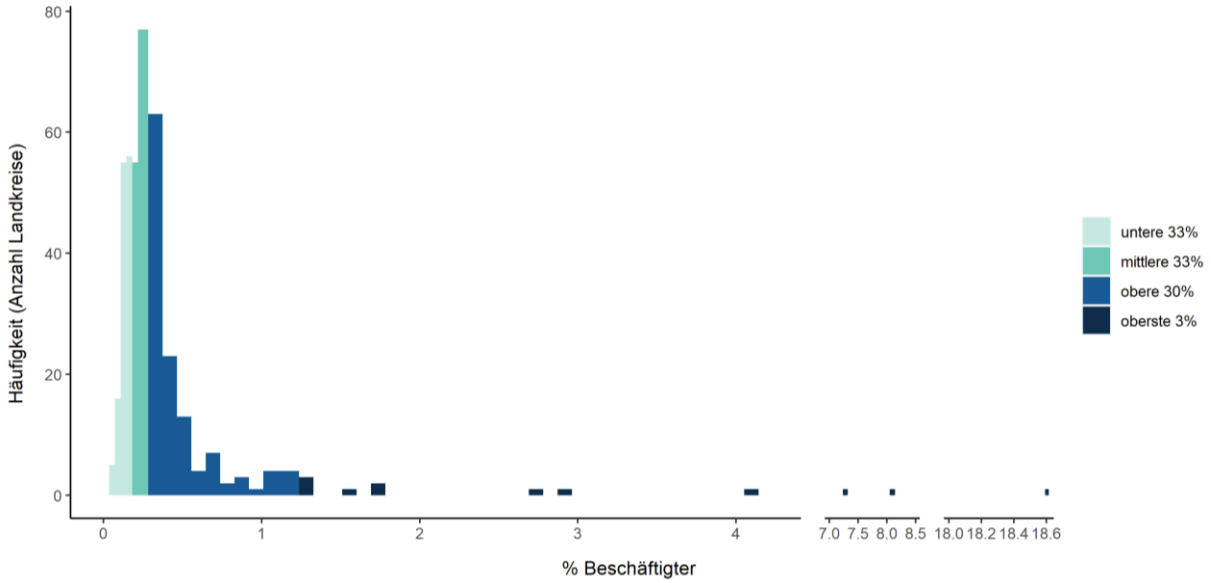

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung Anteil Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei an Gesamtbeschäftigung je Landkreis**



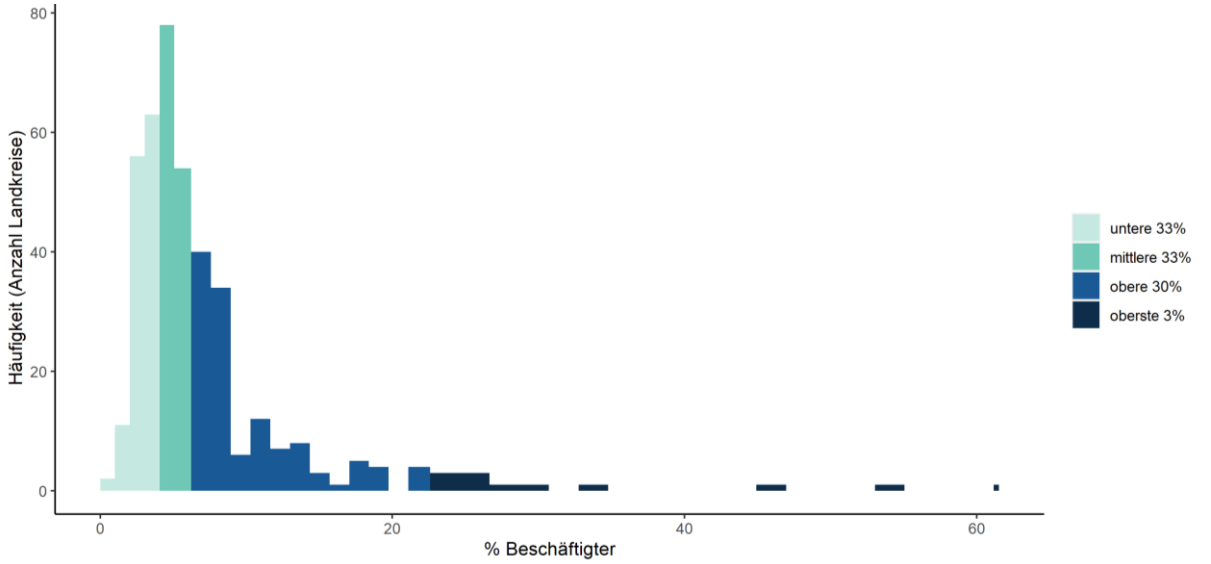

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Gesamtbeschäftigung je Landkreis**



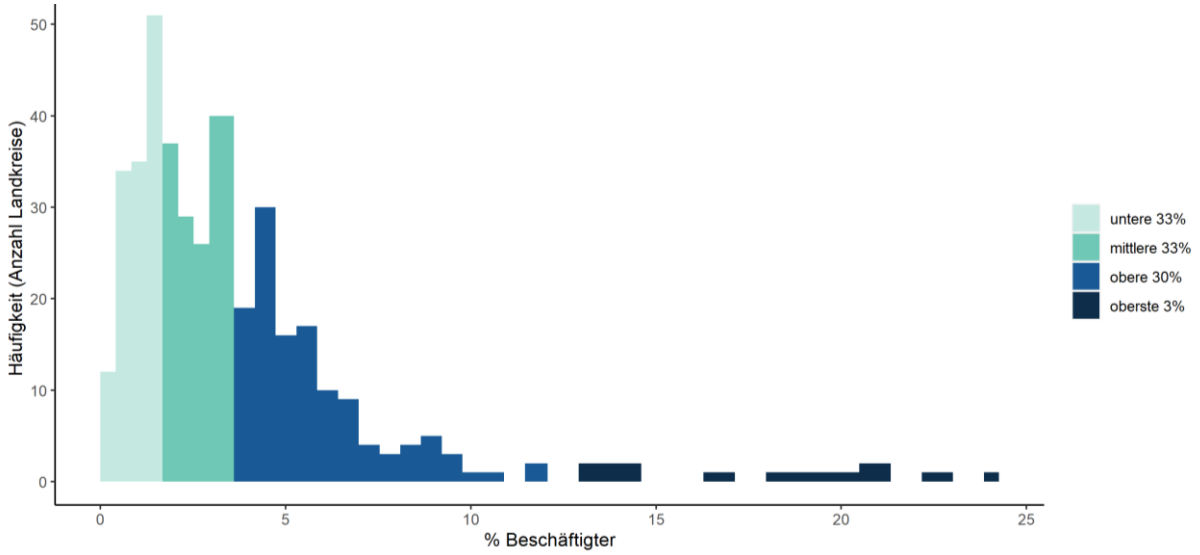

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung im Verkehrssektor an Beschäftigung im Sektor Verkehr und Lagerei je Landkreis**



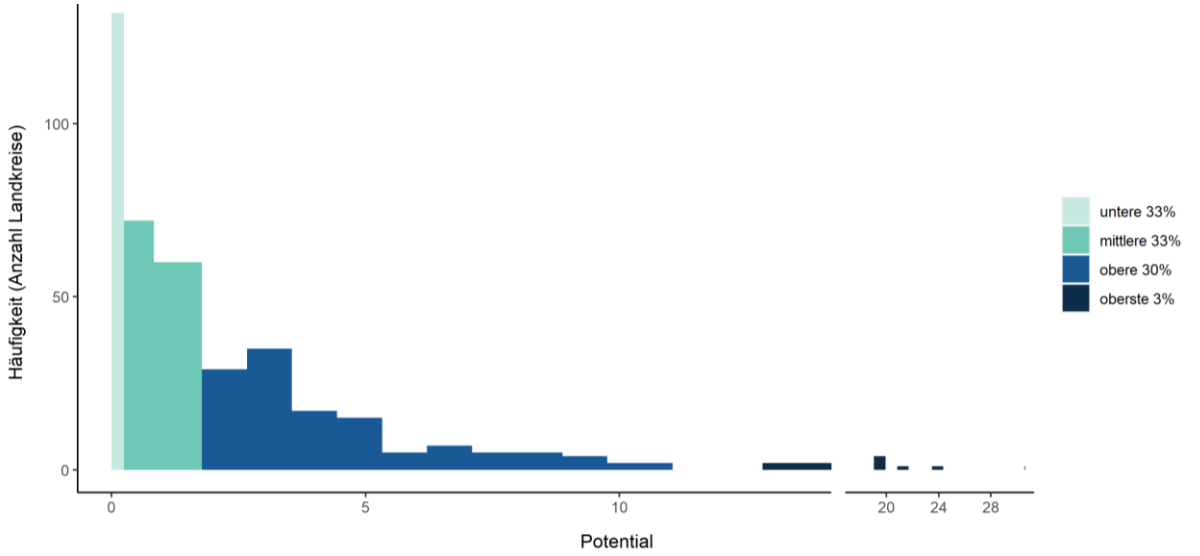

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung Anteil betroffener Beschäftigung in den Sektoren Industrie sowie Verkehr an Gesamtbeschäftigung je Landkreis**




Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesagentur für Arbeit (2023).

**Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung des Wasserstoffpotentials als Vielfaches der Stromnachfrage**



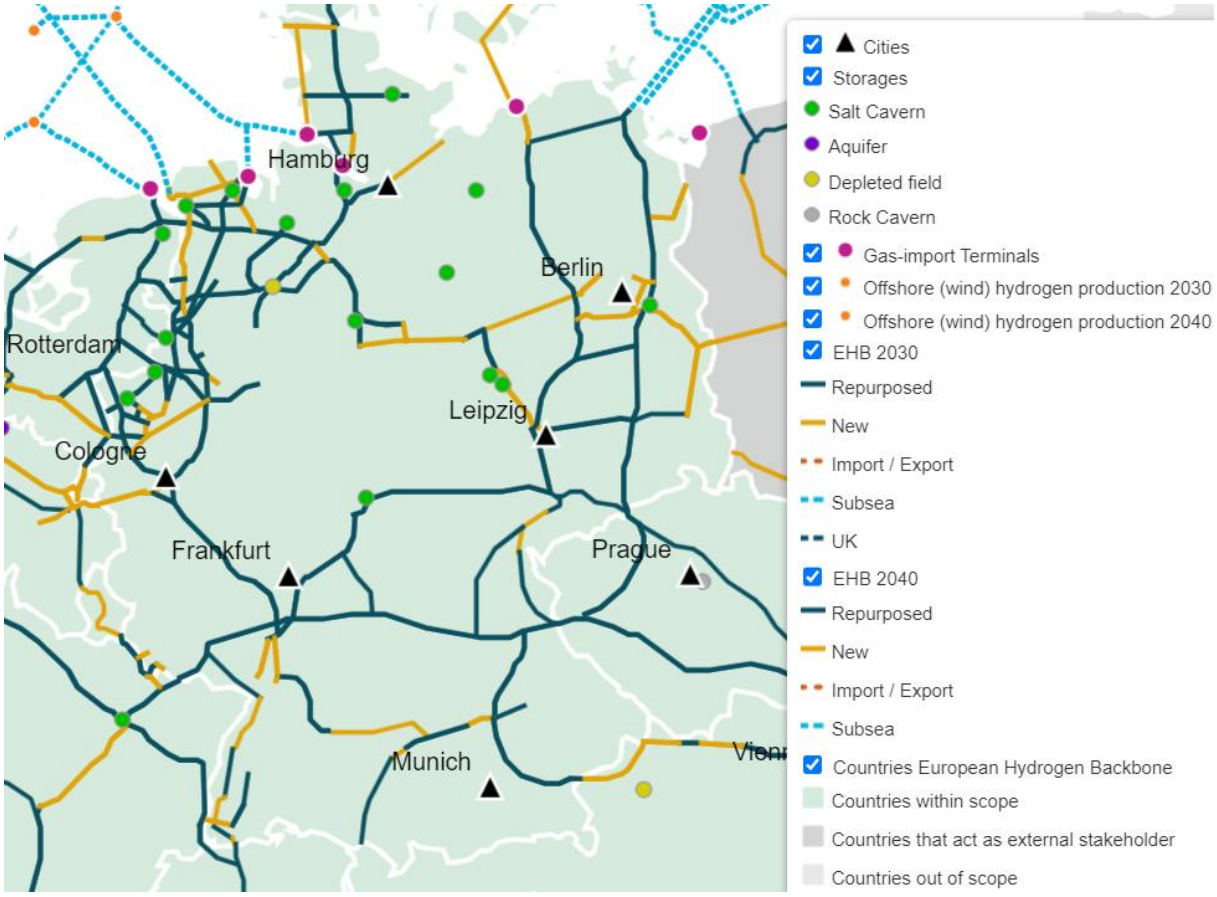

Eigene Darstellung basierend auf Schumm et al. (2024).

**Tabelle 5: Verteilung der Kreise nach nachfrageseitiger und angebotsseitiger Wasserstoffrelevanz**

| Nachfrageseitige Wasserstoffrelevanz | Angebotsseitige Wasserstoffrelevanz | Anteil betroffene Beschäftigung | | Überschuss-potential | | Anzahl Ausprägungen | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| niedrig (untere 33 %) | niedrig (untere 33 %) | >= 0 % | <= 1,7 % | >= 0 | <= 0.2 | 48 | 12 % |
| niedrig (untere 33 %) | mittel (mittlere 33 %) | >= 0 % | <= 1,7 % | > 0.2 | <= 1.8 | 37 | 9 % |
| niedrig (untere 33 %) | hoch (obere 30 %) | >= 0 % | <= 1,7 % | > 1.8 | <= 11.0 | 43 | 11 % |
| niedrig (untere 33 %) | sehr hoch (oberste 3%) | >= 0 % | <= 1,7 % | > 11.0 | <= 30.7 | 4 | 1 % |
| mittel (mittlere 33 %) | niedrig (untere 33 %) | > 1,7 % | <= 3,6 % | >= 0 | <= 0.2 | 39 | 10 % |
| mittel (mittlere 33 %) | mittel (mittlere 33 %) | > 1,7 % | <= 3,6 % | > 0.2 | <= 1.8 | 47 | 12 % |
| mittel (mittlere 33 %) | hoch (obere 30 %) | > 1,7 % | <= 3,6 % | > 1.8 | <= 11.0 | 40 | 10 % |
| mittel (mittlere 33 %) | sehr hoch (oberste 3 %) | > 1,7 % | <= 3,6 % | > 11.0 | <= 30.7 | 6 | 2 % |
| hoch (obere 30 %) | niedrig (untere 33 %) | > 3,6 % | <= 12,1 % | >= 0 | <= 0.2 | 41 | 10 % |
| hoch (obere 30 %) | mittel (mittlere 33 %) | > 3,6 % | <= 12,1 % | > 0.2 | <= 1.8 | 41 | 10 % |
| hoch (obere 30 %) | hoch (obere 30 %) | > 3,6 % | <= 12,1 % | > 1.8 | <= 11.0 | 40 | 10 % |
| hoch (obere 30 %) | sehr hoch (oberste 3 %) | > 3,6 % | <= 12,1 % | > 11.0 | <= 30.7 | 2 | 1 % |
| sehr hoch (oberste 3 %) | niedrig (untere 33 %) | > 12,1 % | <= 24,3 % | >= 0 | <= 0.2 | 4 | 1 % |
| sehr hoch (oberste 3 %) | mittel (mittlere 33 %) | > 12,1 % | <= 24,3 % | > 0.2 | <= 1.8 | 7 | 2 % |
| sehr hoch (oberste 3 %) | hoch (obere 30 %) | > 12,1 % | <= 24,3 % | > 1.8 | <= 11.0 | 1 | 0.3 % |
| sehr hoch (oberste 3 %) | sehr hoch (oberste 3%) | > 12,1 % | <= 24,3 % | > 11.0 | <= 30.7 | 0 | 0 % |

Quelle: Eigene Darstellung.

**Abbildung 25: Geplanter Verlauf der European Hydrogen Backbone bis 2040**




Quelle: European Hydrogen Backbone (2024).